

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marko Mikulec**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Doc. dr. sc. Nikola Vladimir

Student:

Marko Mikulec

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Nikoli Vladimiru na iznimnoj suradnji i znanju koje sam stekao prilikom pisanja ovog rada. Također se zahvaljujem svojoj obitelji i djevojci Anamariji na pruženoj ljubavi, podršci i razumijevanju tijekom cijelog studija.

Marko Mikulec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marko Mikulec**

Mat. br.:

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena hibridne statističke analize energije u prognozi razina buke na brodovima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of the hybrid statistical energy analysis in the noise level assessment on board ships**

Opis zadatka:

Međunarodna pomorska organizacija (IMO) izmjenama zakonske regulative od 1. srpnja 2014. god. uvela je obveznu provjeru razina buke na novoizgrađenim brodovima, te za određene prostore na brodu propisala njihove maksimalne dopuštene vrijednosti. Stoga se postupak osnivanja broda usložnjuje, a buka koja nastaje radom strojeva i uređaja sve većih snaga predstavlja sve važniji projektni kriterij, što je osobito izraženo kod brodova namijenjenih prijevozu putnika. U diplomskom radu je potrebno istražiti mogućnost primjene hibridne statističke analize energije u prognozi razina buke na brodovima koristeći komercijalni programski paket Designer-NOISE. Kao ilustrativni primjer potrebno je obraditi jaružalo na vlastiti pogon nosivosti 2200 t, u dva osnovna operativna režima (jaružanje i plovidba).

Zadatak treba sadržavati:

- opis osnovne zakonske regulative iz područja brodske akustike,
- pregled metoda za prognozu buke (s naglaskom na hibridnu statističku analizu energije),
- detaljan tehnički opis analiziranog plovila i numeričkog modela,
- popis izvora buke i njihove značajke,
- analizu rezultata proračuna.

Za prostore u kojima su razine buke iznad dopuštenih, dati prijedlog mjera za sanaciju.

Naposljetku, potrebno je analizirati utjecaj projektnih i radnih parametara izvora na razine buke u odabranim brodskim prostorima.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

3. svibnja 2018.

Datum predaje rada:

5. srpnja 2018.

Predviđeni datumi obrane:

11., 12. i 13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Nikola Vladimir

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli



## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. OSNOVNI POJMOVI I PRINCIPI U BRODSKOJ AKUSTICI.....	3
2.1. Definicije osnovnih pojmova .....	3
2.2. Izvori buke na brodu i njena propagacija kroz brodsku konstrukciju.....	9
2.3. Mjerenje buke na brodovima .....	12
2.4. Utjecaj buke na zdravlje čovjeka .....	15
2.5. Redukcija buke na brodovima – zvučna izolacija.....	16
3. ZAKONSKA REGULATIVA U BRODSKOJ AKUSTICI .....	19
4. PRORAČUNSKE METODE ZA ANALIZU BUKE .....	25
4.1. Metoda konačnih elemenata.....	25
4.2. Metoda energetske konačnih elemenata .....	26
4.3. Metoda hibridne statističke analize energije.....	27
5. OPIS KORIŠTENE PROGRAMSKE PODRŠKE.....	31
6. TEHNIČKI PODACI ANALIZIRANOG BRODA I IZVORA BUKE.....	35
6.1. Tehničke značajke broda.....	35
6.2. Izvori buke na jaružalu.....	38
7. NUMERIČKI MODEL .....	41
8. REZULTATI .....	47
8.1. Rezultati proračuna za kabinu za posadu u krmenom dijelu nadgrađa.....	47
8.2. Rezultati proračuna za brodski bar.....	55
8.3. Skupni rezultati za sve brodske prostore od interesa .....	62
9. ZAKLJUČAK.....	63
LITERATURA.....	65
PRILOZI.....	68

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Frekvencijski spektar koji čuje ljudsko uho [6] .....	3
Slika 2.	Dijagram zvučnog tlaka; 1–tišina, 2–zvuk, 3–atmosferski tlak, 4–zvučni tlak.....	4
Slika 3.	Krivulje jednake glasnoće [7].....	6
Slika 4.	Krivulje za ponderiranje razina zvuka.....	7
Slika 5.	Glavni izvori buke na brodu [11] .....	9
Slika 6.	Koncept propagacije zvučne energije od izvora do prijemnika [11].....	10
Slika 7.	Distribucija buke na putničkom brodu [11] .....	11
Slika 8.	Propagacija buke na brodu [12].....	11
Slika 9.	Integrirajući zvukomjer [14] .....	12
Slika 10.	Karakteristične razine buke u svakodnevnom životu [6] .....	15
Slika 11.	Širenje zvuka [17] .....	16
Slika 12.	Kategorije materijala prema vrijednosti $\alpha_w$ [21] .....	18
Slika 13.	Primjer tipičnih mreža konačnih elemenata za analize vibracija brodskih konstrukcija .....	26
Slika 14.	Primjer modela broda za analizu hibrodnom statističkom analizom energije.....	27
Slika 15.	Podsustav (a) i dva spregnuta podsustava (b) [34].....	28
Slika 16.	Četiri spregnuta podsustava [34].....	29
Slika 17.	Grafičko korisničko sučelje u <i>Designer-NOISEu</i> .....	31
Slika 18.	Korisničko sučelje za zadavanje parametara izvora buke .....	32
Slika 19.	Korisničko sučelje za zadavanje izolacijskih materijala .....	33
Slika 20.	Jaružalo na vlastiti pogon u fazi opremanja .....	36
Slika 21.	Jaružalo na vlastiti pogon u plovidbi.....	36
Slika 22.	Opći plan analiziranog jaružala na vlastiti pogon .....	37
Slika 23.	Pojednostavljivanje konstrukcije pri modeliranju [12] .....	42
Slika 24.	Topološki model analiziranog broda .....	43
Slika 25.	Proračunski model – aksonometrijski prikaz .....	44
Slika 26.	Proračunski model – pogled s krme .....	44
Slika 27.	Poprečni presjeci proračunskog modela.....	45
Slika 28.	Donja paluba.....	46
Slika 29.	Položaj kabine za posadu u krmenom dijelu nadgrađa (označeno žuto).....	48
Slika 30.	Razine zvučnog tlaka u kabini posade, brod bez izolacije za vrijeme plovidbe ...	49
Slika 31.	Razine zvučnog tlaka u kabini posade, brod bez izolacije za vrijeme jaružanja...	50
Slika 32.	Razine zvučnog tlaka u kabini posade, brod s izolacijom za vrijeme plovidbe....	51
Slika 33.	Razine zvučnog tlaka u kabini posade, brod s izolacijom za vrijeme jaružanja ...	52
Slika 34.	Razine zvučnog tlaka u kabini posade uslijed rada desnog vitla za bočnu užad...	53
Slika 35.	Položaj brodskog bara (označeno žuto).....	55
Slika 36.	Razine zvučnog tlaka u brodskom baru, brod bez izolacije za vrijeme plovidbe .	56
Slika 37.	Razine zvučnog tlaka u brodskom baru, brod bez izolacije za vrijeme jaružanja.	57
Slika 38.	Razine zvučnog tlaka u brodskom baru, brod s izolacijom za vrijeme plovidbe..	58
Slika 39.	Razine zvučnog tlaka u brodskom baru, brod s izolacijom za vrijeme jaružanja .	59
Slika 40.	Razine zvučnog tlaka u brodskom baru uslijed rada drugog glavnog motora .....	60

Slika 41.	Razine zvučnog tlaka u kabini za dva člana posade, brod bez izolacije za vrijeme plovidbe.....	73
Slika 42.	Razine zvučnog tlaka u kabini za dva člana posade, brod bez izolacije za vrijeme jaružanja .....	74
Slika 43.	Razine zvučnog tlaka u kabini za dva člana posade, brod s izolacijom za vrijeme plovidbe.....	75
Slika 44.	Razine zvučnog tlaka u kabini za dva člana posade, brod s izolacijom za vrijeme jaružanja .....	76
Slika 45.	Razine zvučnog tlaka u upravljačkoj sobi strojarne, brod bez izolacije za vrijeme plovidbe.....	77
Slika 46.	Razine zvučnog tlaka u upravljačkoj sobi strojarne, brod bez izolacije za vrijeme jaružanja .....	78
Slika 47.	Razine zvučnog tlaka u upravljačkoj sobi strojarne, brod s izolacijom za vrijeme plovidbe.....	79
Slika 48.	Razine zvučnog tlaka u upravljačkoj sobi strojarne, brod s izolacijom za vrijeme jaružanja .....	80
Slika 49.	Razine zvučnog tlaka u kantini 2, brod bez izolacije za vrijeme plovidbe .....	81
Slika 50.	Razine zvučnog tlaka u kantini 2, brod bez izolacije za vrijeme jaružanja.....	82
Slika 51.	Razine zvučnog tlaka u kantini 2, brod s izolacijom za vrijeme plovidbe.....	83
Slika 52.	Razine zvučnog tlaka u kantini 2, brod s izolacijom za vrijeme jaružanja .....	84
Slika 53.	Razine zvučnog tlaka u kormilarnici, brod bez izolacije za vrijeme plovidbe.....	85
Slika 54.	Razine zvučnog tlaka u kormilarnici, brod bez izolacije za vrijeme jaružanja.....	86
Slika 55.	Razine zvučnog tlaka u kormilarnici, brod s izolacijom za vrijeme plovidbe .....	87
Slika 56.	Razine zvučnog tlaka u kormilarnici, brod s izolacijom za vrijeme jaružanja.....	88

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Rezultati pojednostavljenog proračuna dnevne razine izloženosti buci [10].....	9
Tablica 2. Minimalna vrijednost $R_w$ za pregrade prema [10] .....	17
Tablica 3. Usporedba dopuštenih razina buke u dB(A) prema Rezolucijama A.468(XII) i MSC-337(91).....	20
Tablica 4. Konstrukcijski materijali u bazi podataka [12] .....	33
Tablica 5. Izolacijski slojevi u bazi podataka [12] .....	34
Tablica 6. Koeficijenti apsorpcije zvuka apsorpcijske izolacije u bazi podataka [12].....	34
Tablica 7. Razine buke glavnih motora.....	39
Tablica 8. Razine buke reduktora glavnih motora .....	39
Tablica 9. Razine buke pumpi za jaružanje.....	39
Tablica 10. Razine buke reduktora pumpi za jaružanje .....	39
Tablica 11. Razine buke vitala (za bočnu užad i podizanje kopača).....	40
Tablica 12. Razine buke ventilatora strojarnice .....	40
Tablica 13. Razine buke vanjske jedinice klimatizacije.....	40
Tablica 14. Razine buke reduktora vijaka .....	40
Tablica 15. Doprinos pojedinih izvora ukupnoj razini zvučnog tlaka u kabini za posadu.....	54
Tablica 16. Doprinos pojedinih izvora ukupnoj razini zvučnog tlaka u brodskom baru .....	61
Tablica 17. Predviđene razine zvučnog tlaka za sve odjeljke od interesa.....	62

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$v$	m/s	brzina zvuka
$f$	Hz	frekvencija zvuka
$T$	s	vrijeme
$I$	W/m <sup>2</sup>	jakost zvuka
$L$	dB	razina jakosti zvuka
$p$	Pa	zvučni tlak
$L_p$	dB	razina zvučnog tlaka
$P$	W	zvučna snaga
$L_W$	dB	razina zvučne snage
$L_{Aeq,T}$	dB(A)	A-ponderirana ekvivalentna kontinuirana razina zvuka
$L_{Ceq,T}$	dB(A)	C-ponderirana ekvivalentna kontinuirana razina zvuka
$L_{ex,24h}$	dB(A)	Dnevna A-ponderirana razina izloženosti buci
$R$	dB	indeks smanjenja zvuka
$R_w$	dB	ponderirani indeks smanjenja zvuka
$\alpha_s$	sabin	koeficijent apsorpcije zvuka
$\alpha_w$	sabin	ponderirani koeficijent apsorpcije zvuka
$E$	J	energija
$\eta$		faktor gubitka prigušenja

## SAŽETAK

U ovom diplomskom radu analizirane su razine buke na jaružalu na vlastiti pogon, uslijed rada brodskih strojeva i uređaja, metodom hibridne statističke analize energije. Nakon uvodnih napomena vezanih za formulaciju problema i motivaciju, u radu su objašnjeni osnovni pojmovi u tehničkoj akustici, s posebnim osvrtom na glavne izvore buke i modalitete njezinog širenja na brodu. Nadalje, obrađena je aktualna zakonska regulativa vezana za problematiku buke na brodovima, te je dan pregled osnovnih numeričkih metoda za analizu buke, s naglaskom na hibridnu statističku analizu energije koja je korištena u numeričkom primjeru. Prikazane su tehničke značajke analiziranog broda i navedeni su osnovni izvori buke, zajedno s kvantitativnim pokazateljima. Korišten je komercijalni programski paket *Designer-NOISE*, dostupan na Katedri za strojeve i uređaje plovnih objekata FSB-a, pri čemu je detaljno opisan postupak izrade modela i analize buke. Rezultati uključuju razine buke za niz odabranih odjeljaka na brodu (tzv. prostore od interesa), u dva tipična eksploatacijska režima broda; plovidba i jaružanje. Za prostore gdje su uočene prekomjerne razine buke, definirana su tehnička rješenja kojima su spomenute vrijednosti svedene unutar dopuštenih granica. Naposljetku, uz zaključna razmatranja diplomskog rada, prodiskutirani su trenutni izazovi u brodskoj akustici sa smjernicama za daljnja istraživanja.

Ključne riječi: brodska akustika, buka, hibridna statistička analiza energije, jaružalo na vlastiti pogon, zvučna izolacija, jaružanje, plovidba.

## SUMMARY

In this thesis, the noise levels on board self-propelled dredging vessel caused by ship engines and devices, have been assessed by the hybrid Statistical Energy Analysis (SEA). After the introduction, definition of basic terms in technical acoustics are provided with particular emphasis to main noise sources and noise propagation ways on board ships. Furthermore, actual rules and regulations related to noise problems in ships have been dealt with, and overview of basic numerical methods for noise assessment has been provided, where special attention is paid to hybrid SEA, due to its application in the illustrative numerical example. Ship particulars and main noise sources are listed together with noise excitation levels. A commercial software package *Designer-NOISE*, available at the Chair of Marine Engineering of the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture is used for the noise level assessment on board the vessel, whereas model generation and noise analysis procedures, respectively, have been described in detail. The results include noise levels for a range of ship compartments for two typical operating modes, i.e. sailing and dredging. For those compartments where excessive noise levels are obtained, appropriate technical solutions have been recommended in order to decrease them to the acceptable values. Finally, together with the concluding remarks of this thesis, challenges in ship acoustics have been discussed and some guidelines for further investigations are drawn.

Key words: ship acoustics, noise, hybrid Statistical Energy Analysis, self propelled dredging vessel, sound insulation, dredging, sailing.

## 1. UVOD

Izmjenama zakonske regulative od strane Međunarodne pomorske organizacije (IMO) koje su na snagu stupile 1. srpnja 2014. godine buka na brodovima postaje sve važniji projektni kriterij čime se postupak osnivanja broda znatno usložnjuje. Iako je problem buke na brodovima, koji se redovito razmatra simultano s problemima vibracija, poznat već nekoliko desetljeća, on danas postaje sve izraženiji u brodograđevnoj i pomorskoj praksi, kako zbog ugradnje brodskih strojeva sve većih snaga, tako i zbog brige brodovlasnika i regulatornih institucija za zdravlje posade i putnika na brodovima. Štoviše, u posljednjih nekoliko godina vodeća klasifikacijska društva kao što su *Det Norske Veritas – Germanischer Lloyd (DNV-GL)*, *Bureau Veritas (BV)*, *Lloyd's Register of Shipping (LR)* uvode tzv. klase udobnosti (eng. *Comfort class*) kojima daju posebnu klasnu notaciju (a time i veći marketinški značaj) brodovima s višom razinom udobnosti, odnosno nižim razinama buke. Negativni utjecaji buke na zdravlje, ali i trenutnu radnu sposobnost čovjeka, poznati su u gotovo svim sferama ljudskog djelovanja. U brodograđevnoj praksi problemi buke do sada su se značajnije razmatrali uglavnom kod brodova za prijevoz putnika i manjih brodova s većim instaliranim snagama, ali je izvjesno da će u bližoj budućnosti biti obuhvaćeni svi tipovi brodova. Predmet istraživanja brodske akustike u najširem smislu predstavlja buka koju brodski strojevi i uređaji emitiraju u okoliš i buka na samom brodu kojoj su izloženi putnici i posada. Osim buke na brodovima, i izraženije brige za zdravlje čovjeka, poseban problem predstavlja i buka u brodogradilištima [1]. Nadalje, u usporedbi s brodograđevnom industrijom, istraživanje buke do sada je bilo puno značajnije u zrakoplovstvu, cestovnom prometu, zgradarstvu i sl., pa je stoga i većina metoda za prognozu buke inicijalno razvijana za te svrhe. Kao što je prethodno navedeno, problem buke na brodovima aktualiziran je u novije vrijeme [2,3,4], što ujedno implicira i dosta nepoznanica, ne samo u metodama za prognozu buke, već dovodi u pitanje i valjanost postojećih normi. Detektiranje akustičkih problema u ranoj fazi osnivanja broda vrlo je teško i nepouzđano i takvi se problemi redovito utvrđuju mjerenjima razina buke neposredno prije predaje broda brodovlasniku. Istovremeno, otklanjanje problema u završnoj fazi izgradnje broda iznimno je skupo i za brodogradilište (kašnjenje u isporuci) i za brodovlasnika (nemogućnost korištenja broda) pa je već u inicijalnoj fazi potrebno napraviti



prognozu buke kako bi se eventualni akustički nedostaci mogli na vrijeme sanirati i kako bi cijena potencijalnih sanacija bila minimalna. Za takve potrebe razvijaju se posebni računalni alati kojima je moguće, s dovoljnom točnošću, predvidjeti pojavu akustičkog problema i unaprijed definirati odgovarajuća rješenja.

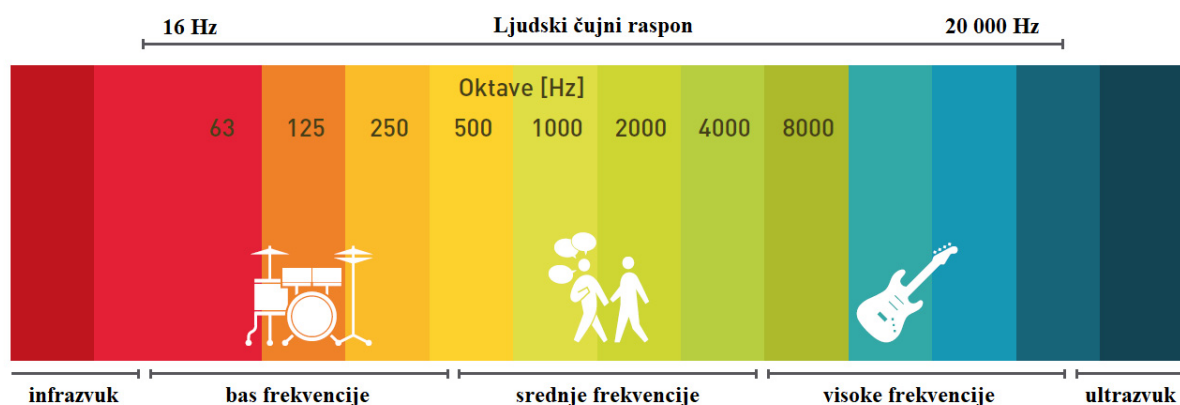
Metode za prognozu buke na brodovima detaljnije su opisane u nastavku rada, pri čemu valja izdvojiti hibridnu statističku analizu energije kao relativno jednostavnu, ali vrlo pouzdanu metodu za predviđanje buke viših frekvencija, zbog čega je i najzastupljenija u brodogradnji.

Spomenuti problemi i izazovi u brodskoj akustici motivacija su za izradu ovog diplomskog rada u kojem je hibridna statistička analiza energije primijenjena za prognozu buke na jaružalu na vlastiti pogon *Ibn Battuta*, izgrađenom u hrvatskom brodogradilištu Uljanik. Diplomski rad koncipiran je kroz devet poglavlja, pri čemu je nakon uvodnog poglavlja, u zasebnoj cjelini, dan kratak pregled osnovnih pojmova u tehničkoj akustici s naglaskom na brodograđevnu primjenu. Treće poglavlje vezano je za zakonsku regulativu koja se odnosi na definiranje dopuštenih razina buke i postupke mjerenja buke na brodovima. U četvrtom poglavlju objašnjeni su principi osnovnih metoda za analizu buke na brodovima s naglaskom na već spomenutu i u ovom radu na ilustrativnom primjeru primijenjenu hibridnu statističku analizu energije na kojoj se temelji komercijalni programski paket *Designer-NOISE* čiji je opis dan u petom poglavlju. U šestom poglavlju navedene su tehničke značajke analiziranog broda s popisom izvora buke i pripadajućim emitiranim razinama buke. Generirani model za prognozu buke opisan je u sedmom poglavlju, a rezultati proračuna prikazani su u osmom poglavlju ovog rada. Naposljetku, dan je zaključak diplomskog rada s prijedlogom smjernica za daljnja istraživanja.

## 2. OSNOVNI POJMOVI I PRINCIPI U BRODSKOJ AKUSTICI

### 2.1. Definicije osnovnih pojmova

Zvuk se može definirati kao mehanički val frekvencija od 16 Hz do 20 kHz, odnosno u rasponu u kojem ga čuje ljudsko uho, Slika 1. Zvuk frekvencije niže od 16 Hz naziva se infrazvukom, zvuk frekvencije više od 20 kHz ultrazvukom, a ako je frekvencija viša od 1 GHz hiperzvukom. Zvuk nastaje periodičnim titranjem izvora zvuka koji mijenja tlak medija u neposrednoj okolini. Taj se poremećaj tlaka prenosi na susjedne čestice medija i širi se u obliku longitudinalnih valova u plinovima i kapljevinama, odnosno u obliku longitudinalnih i transverzalnih valova u krutinama. Zvuk se širi bez prijenosa mase, ali se njime prenose impuls i energija [5].



Slika 1. Frekvencijski spektar koji čuje ljudsko uho [6]

Brzina zvuka ovisi o gustoći i elastičnim silama u krutinama i kapljevinama dok u plinovima ovisi o gustoći, temperaturi i tlaku. Brzinu zvuka (oznaka  $v$ ) izražavamo uobičajenim mjernima jedinicama za brzinu (m/s, km/h), ali i bezdimenzijskom jedinicom mach (Ma). Mach, tj. Machov broj predstavlja omjer brzine tijela koje se giba kroz fluid i brzine zvuka u istome fluidu. Brzine se, prema Machovu broju, dijele na podzvučne ( $Ma < 1$ ) i nadzvučne ( $Ma > 1$ ).

Buku definiramo kao vrlo glasni, čovjeku neugodni, zvuk. Osnovne značajke buke sadržane su u njezinu intenzitetu, ali i u njezinoj kakvoći (dodatni šumovi), visini, trajanju,

isprekidanosti ili kontinuiranosti. Stupanj smetanja ovisi o psihološkim čimbenicima (o vrsti zvučnih informacija, očekivanju ili nenadanosti i dr.) [5]. Znanstvenici već desetljećima provode istraživanja koja ukazuju na negativne utjecaje buke na zdravlje čovjeka. Kao odgovor na spomenuta istraživanja, pojavljuju se brojne zakonske regulative koje su pobliže opisane u trećem poglavlju.

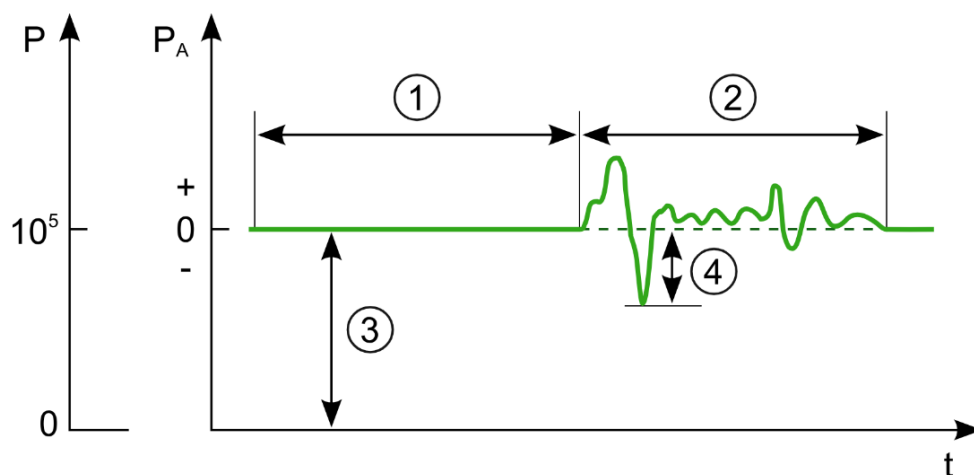
Jakost zvuka (oznaka  $I$ ), fizikalna je veličina koja opisuje energiju zvučnog vala u vremenskom intervalu kroz površinu okomitu na smjer širenja vala. SI jedinica za intenzitet, uključujući intenzitet zvuka, je vat po metru kvadratnom ( $\text{W/m}^2$ ). Najmanja jakost zvuka koju ljudsko uho može čuti iznosi  $I_0 = 1 \text{ pW/m}^2 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ , a naziva se prag čujnosti.

Razina jakosti zvuka (oznaka  $L$ ) je mjerna veličina prilagođena osjetljivosti ljudskog uha i definirana je kao deseterostruki logaritam omjera jakosti nekoga zvuka i praga čujnosti:

$$L = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right). \quad (1)$$

Mjerna jedinica za razinu jakosti zvuka je decibel (dB). Najmanja vrijednost jakosti zvuka koju ljudsko uho može osjetiti iznosi 0 dB.

Zvučni tlak ili akustički tlak (oznaka  $p$ ), Slika 2, je lokalno odstupanje tlaka od prosječnog atmosferskog tlaka, uzrokovano zvučnim valom.



Slika 2. Dijagram zvučnog tlaka; 1–tišina, 2–zvuk, 3–atmosferski tlak, 4–zvučni tlak

U zraku se zvučni tlak može mjeriti pomoću mikrofona, a u vodi pomoću hidroфона. SI jedinica za zvučni tlak je paskal (Pa). Referentna vrijednosti zvučnog tlaka iznosi  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$  i smatra se apsolutnim pragom čujnosti.

Razina zvučnog tlaka (eng. *Sound pressure level, SPL*) je logaritamska mjera efektivnog zvučnog tlaka u odnosu na referentnu vrijednost, a izražava se u decibelima:

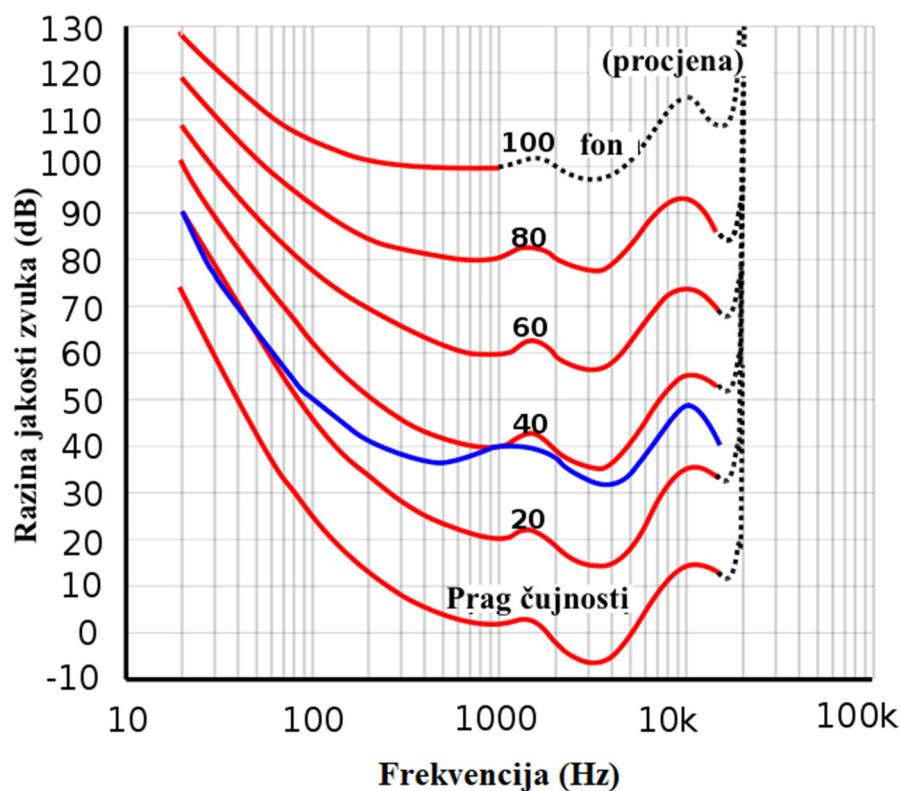
$$L_p = 20 \log \left( \frac{p}{p_0} \right). \quad (2)$$

Zvučna ili akustična snaga (oznaka  $P$ ) je brzina kojom se energija zvuka emitira, reflektira, prenosi ili prima, u jedinici vremena. Mjerna jedinica u SI sustavu za zvučnu snagu je vat (W). Za razliku od zvučnog tlaka, zvučna snaga izvora zvuka neovisna je o prostoru i udaljenosti od izvora. Zvučni tlak je svojstvo točke u prostoru dok je zvučna snaga svojstvo izvora zvuka i jednaka je ukupnoj snazi koju izvor emitira u svim smjerovima. Referentna vrijednost zvučne snage iznosi  $P_0 = 10^{-12} \text{ W}$ .

Razina zvučne snage (eng. *Sound power level* ili *SWL*) je logaritamska mjera efektivne zvučne snage u odnosu na referentnu zvučnu snagu, a izražava se u decibelima:

$$L_W = 10 \log \left( \frac{P}{P_0} \right). \quad (3)$$

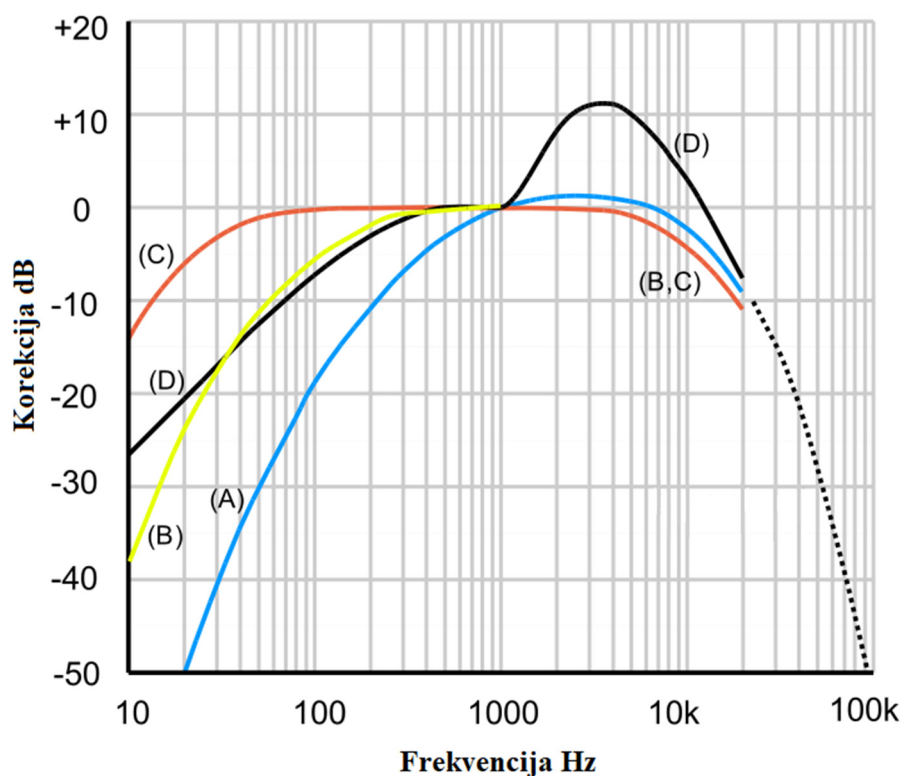
Glasnoća je subjektivna veličina kojom opisujemo percepciju zvučnog tlaka. Odnos fizikalnih svojstava zvuka i percipirane glasnoće sastoji se od fizičkih, fizioloških i psiholoških komponenti. Proučavanje prividne glasnoće dio je psihoakustike, pri čemu se koriste metode svojstvene psihofizici. Mjerna jedinica za glasnoću je son, a za razinu glasnoće fon. S obzirom da se osjetljivost ljudskog uha mijenja s frekvencijom, kao što je prikazano na Slici 3, rezultati mjerenja buke korigiraju se različitim filterima kako bi rezultati odgovarali glasnoći koju bi percipirala prosječna osoba.



Slika 3. Krivulje jednake glasnoće [7]

Najčešće primjenjivani filter je A-ponderiranje, a propisan je međunarodnom normom IEC 61672-1:2013 [8]. A-ponderiranje primjenjuje se na instrumentom izmjerene vrijednosti razine zvučnog tlaka kako bi se u obzir uzela relativna glasnoća koju percipira ljudsko uho, s obzirom da je uho manje osjetljivo na niže frekvencije zvuka. Provodi se zbrajanjem unaprijed određenih vrijednosti po oktavama, odnosno trećinskim oktavama, s izmjerenim vrijednostima razine zvučnog tlaka u decibelima. Rezultirajuće vrijednosti po oktavama zbrajaju se logaritamskom metodom kako bi se dobila jedinstvena, A-ponderirana, vrijednost koja karakterizira zvuk. A-ponderirana vrijednost navodi se s mjernom jedinicom dB(A).

Osim A-ponderiranja, postoje i druge krivulje za ponderiranje; B, C, D i Z, Slika 4. Ove krivulje bile su namijenjene za različite prosječne razine zvuka. Prvotna namjena A-ponderiranja bila je korigiranje rezultata mjerenja niskih razina glasnoće (oko 40 fona), a danas se uobičajeno koristi za mjerenja buke u okolišu i industrijske buke te za procjenu rizika oštećenja sluha i ostalih negativnih utjecaja buke, pri svi razinama zvuka.



Slika 4. Krivulje za ponderiranje razina zvuka

Iako je A-ponderiranje najčešće u upotrebi, C-ponderiranje primjenjuje se kod mjerenja vršnih vrijednosti te za mjerenja u zabavnoj industriji gdje prijenos niskih frekvencija može predstavljati problem. C-ponderirane vrijednosti imaju jedinicu dB(C).

Z-ponderiranje ili tzv. nulto ponderiranje uvedeno je normom IEC 61672-1:2013 [8] kao zamjena za linearno frekvencijsko ponderiranje koje su često koristili proizvođači zvukomjera. Ova promjena bila je potrebna s obzirom da su proizvođači proizvoljno određivali korekcije za visoke i niske frekvencije (-3 dB) što je rezultiralo različitim očitanjima, posebice pri vršnim vrijednostima.

B i D krivulje opisane su starijom normom IEC 60651 [9], koja je zamijenjena normom IEC 61672-1:2013 [8], a uređaji koji koriste B i D-ponderiranje danas više nisu prihvatljivi za službena mjerenja buke.

A-ponderirana ekvivalentna kontinuirana razina zvuka predstavlja A-ponderiranu razinu zvučnog tlaka kontinuiranog zvuka koji, unutar vremenskog intervala mjerenja  $T$ , ima

jednaku vrijednost korijena srednje vrijednosti kvadrata zvučnog tlaka kao razmatrani zvuk koji je promjenjiv u vremenu. Mjerna jedinica je dB(A), a izražena je formulom:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_a(t)^2}{p_0^2} dt, \quad (4)$$

gdje je:

$T$  – vrijeme mjerenja,

$p_a(t)$  – trenutni, A-ponderirani, zvučni tlak,

$p_0 = 20 \mu\text{Pa}$  – referentni zvučni tlak.

C-ponderirana ekvivalentna kontinuirana razina zvuka predstavlja C-ponderiranu razinu zvučnog tlaka kontinuiranog zvuka koji, unutar vremenskog intervala mjerenja  $T$ , ima jednaku vrijednost korijena srednje vrijednosti kvadrata zvučnog tlaka kao razmatrani zvuk koji je promjenjiv u vremenu. Mjerna jedinica je dB(C), a izražena je formulom:

$$L_{Ceq,T} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_c(t)^2}{p_0^2} dt, \quad (5)$$

gdje je:

$T$  – vrijeme mjerenja,

$p_c(t)$  – trenutni, C-ponderirani, zvučni tlak,

$p_0 = 20 \mu\text{Pa}$  – referentni zvučni tlak.

Dnevna razina izloženosti buci predstavlja ekvivalentnu razinu izloženosti buci za period od 24 sata. Izražava se u dB(A), a dopuštena vrijednost iznosi 80 dB(A) bez korištenja zaštitnih slušalica. Za ilustraciju, u nastavku je prikazan pojednostavljeni proračun za dnevnu izloženost buci električara prema [10]:

$$L_{ex,24h,i} = L_{Aeq,T,i} + 10 \log \left( \frac{T_i}{T_0} \right), \quad (6)$$

gdje je:

$T_i$  – efektivno vrijeme boravka u određenom prostoru,

$T_0 = 24 \text{ h}$  – referentno vremensko razdoblje,

$L_{Aeq,i}$  – A-ponderirana razina kontinuiranog zvuka u određenom prostoru.

Ukupna A-ponderirana razina izloženosti buci računa se na temelju dnevnih razina izloženosti za pojedine prostore prema formuli:

$$L_{ex,24h} = 10 \log \left( \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{ex,24h,i}}{10}} \right). \quad (7)$$

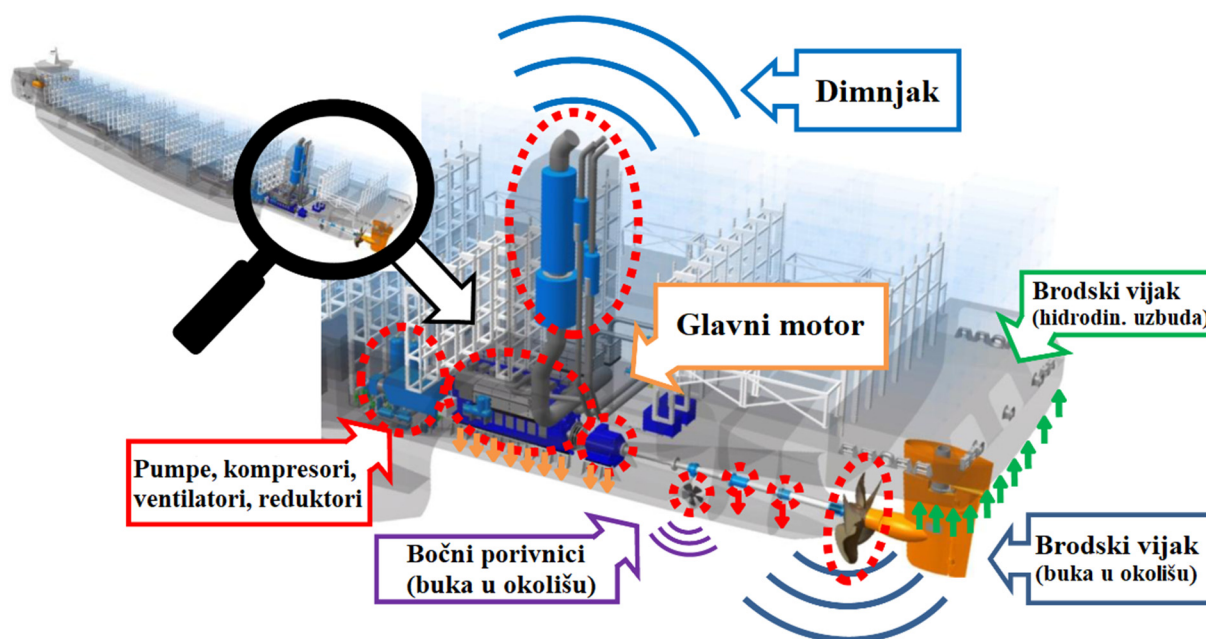
U Tablici 1 dani su rezultati pojednostavljenog proračuna dnevne razine izloženosti buci na primjeru jednog električara, za različite prostore na brodu.

**Tablica 1. Rezultati pojednostavljenog proračuna dnevne razine izloženosti buci [10]**

	Ured	Prostor za nadzor strojeva	Radionice	Strojarnica	Kantina	Izvan dužnosti
$L_{Aeq,i}$ , dB	63	75	84	85	72	60
$T_i$ , h	2	2	5	1	0	14
$L_{ex,24h,i}$ , dB	52,2	64,2	77,2	71,2	0	57,7
$L_{ex,24h}$ , dB	78,3					

## 2.2. Izvori buke na brodu i njena propagacija kroz brodsku konstrukciju

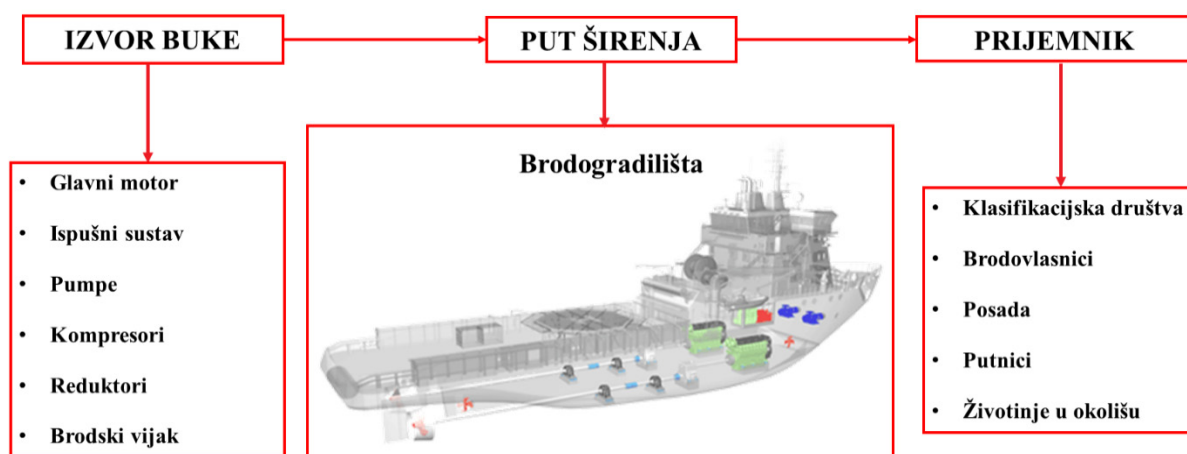
Glavni izvori buke na brodu su: glavni i pomoćni strojevi, reduktori, sustavi ventilacije i klimatizacije, ispušni sustav, pumpe i kompresori, brodski propulzori itd., Slika 5. Glavni izvori vibracija redovito su glavni motor te brodski vijak.



**Slika 5. Glavni izvori buke na brodu [11]**

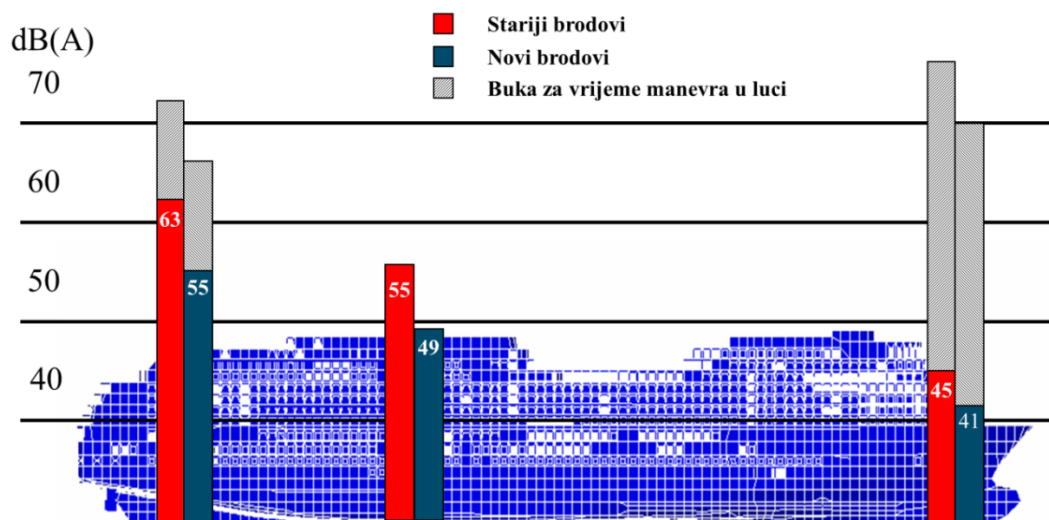


Radi boljeg razumijevanja buke i vibracija, te osnovnih modaliteta njihove propagacije koristi se model prikazan na Slici 6. Spomenuti model ukazuje na tri glavna utjecajna čimbenika na razine buke na brodu, i to: izvor buke, put širenja i prijemnik. Pri tome glavne izvore buke redovito valja tražiti u brodskim strojevima i uređajima, odnosno buci ispušnog sustava, gdje dominantnu ulogu igra proizvođač takvih uređaja i opreme, pri čemu razlikujemo buku koja se širi zrakom (eng. *airborne noise*, *ABN*) i onu koja se širi konstrukcijom (eng. *structureborne noise*, *SBN*). Zvučnu stazu odnosno put širenja predstavlja sama brodska konstrukcija, koja je usko vezana za rezultate rada samog brodogradilišta, dok prijemnike u najširem smislu mogu predstavljati bilo kakvi mjerni uređaji, putnici i posada, pa čak i životinje u moru, ukoliko je riječ o buci koja se emitira u okoliš. Buka očitana na razini prijemnika, predmet je normi i pravila u okviru brodske akustike, a intervencije za smanjivanje buke moguće su na bilo kojem od tri spomenuta čimbenika.



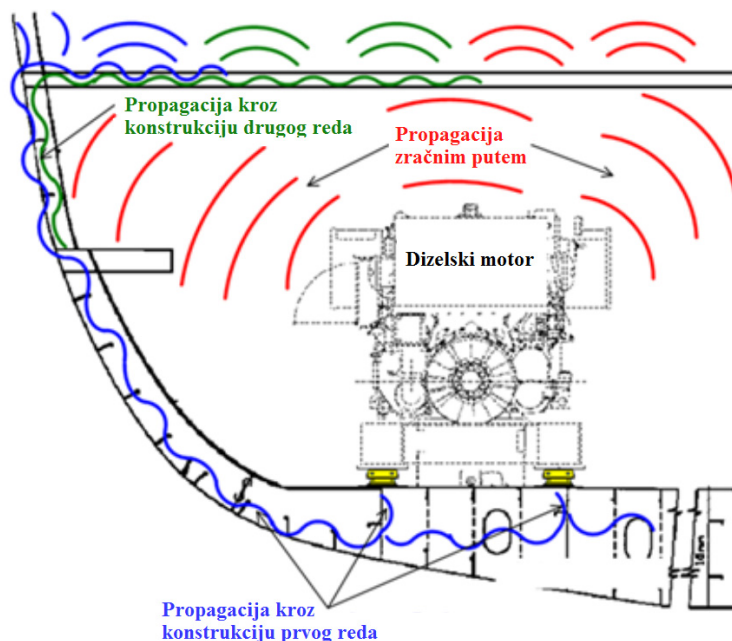
**Slika 6. Koncept propagacije zvučne energije od izvora do prijemnika [11]**

S obzirom da se brodskoj akustici pridaje sve veća pažnja, projektanti su primorani problem buke razmatrati od samog početka novog projekta kako bi se broj eventualnih akustičkih problema sveo na minimum, a time smanjili troškovi gradnje. Slika 7 prikazuje razine buke kod starijih i novijih brodova (izgrađenih u posljednjih 15-ak godina) prema istraživanjima proizvođača brodskih motora *Wärtsilä*, te ukazuje da se primjenom naprednih metoda projektiranja brodskog trupa one značajno mogu reducirati.



Slika 7. Distribucija buke na putničkom brodu [11]

Kao što je spomenuto, dva su primarna načina širenja buke: zrakom i kroz konstrukciju. Širenje buke zrakom rezultat je membranskih vibracija pregrada na koje nailazi početni zvuk. Nailazak zvuka pobuđuje vibracije koje se prenose na okolni zrak s druge strane pregrade. Buka se na konstrukciju prenosi preko temelja izvora, a razlikujemo širenje buke kroz konstrukciju prvog i drugog reda. Slika 8 prikazuje karakteristične putove propagacije buke nastale radom brodskog dizelskog motora.



Slika 8. Propagacija buke na brodu [12]

### 2.3. Mjerenje buke na brodovima

Mjerenje buke na brodovima provodi se pomoću preciznih integrirajućih zvukomjera koji zadovoljavaju kriterije za tzv. uređaje klase 1 dane normom IEC 61672-1:2013 [8]. Zvukomjeri klase 1 omogućavaju mjerenje buke u širem rasponu frekvencija i općenito imaju strože tolerancije u odnosu na manje precizne zvukomjere klase 2. Primjer integrirajućeg zvukomjera klase 1 prikazan je na Slici 9. Oktavni filteri koji se upotrebljavaju samostalno ili u kombinaciji sa zvukomjerom moraju zadovoljavati kriterije dane normom IEC 61260-1:2014 [13].



Slika 9. Integrirajući zvukomjer [14]

Mjerenje mogu provoditi isključivo stručnjaci koji imaju visoku razinu znanja u području akustike i koji su prošli stručno osposobljavanje za provođenje mjerenja buke u skladu s odgovarajućom regulativom. Primjer takve regulative je *IMO Noise Code* [10] koji predstavlja temeljni dokument u području brodske akustike, a detaljnije je opisan u trećem poglavlju.

Mikrofon se za vrijeme mjerenja postavlja na visini između 1,2 m (sjedeći položaj) i 1,6 m (stajući položaj) iznad palube. Udaljenost između dvije mjerne točke mora iznositi minimalno 2 m. Za velike prostore bez strojeva, maksimalna udaljenost između mjernih točaka može iznositi 10 m. Mjerna točka ni u kojem slučaju ne smije biti unutar 0,5 m od granice prostora.

Mjerenje buke potrebno je provesti u svim prostorima u kojima se nalaze strojevi te u pripadajućim kontrolnim prostorima. Mjerne točke ne bi smjele biti bliže od 1 m od strojeva, zračnih usisa, pregrada i ostalih velikih površina.

Mjerenje buke provodi se u blizini svih izvora kao što su:

- Glavni motori i turbine,
- Glavni prijenosnici snage,
- Turbo puhala,
- Pročistači,
- Električni alternatori i generatori,
- Platforma s gorionicima,
- Ventilatori,
- Kompresori,
- Pumpe tereta (i pripadajući pogonski strojevi).

Mjerne točke postavljaju se na udaljenosti 1 m od izvora i to u intervalima ne većim od 3 m oko izvora. Kako bi se izbjegao nepotrebno visok broj mjerenja u slučaju velikih motora i prostora sa strojevima gdje se izmjerena razina zvučnog tlaka u dB(A) značajno ne mijenja vrijednost po intervalima nije potrebno zabilježiti svako očitavanje.

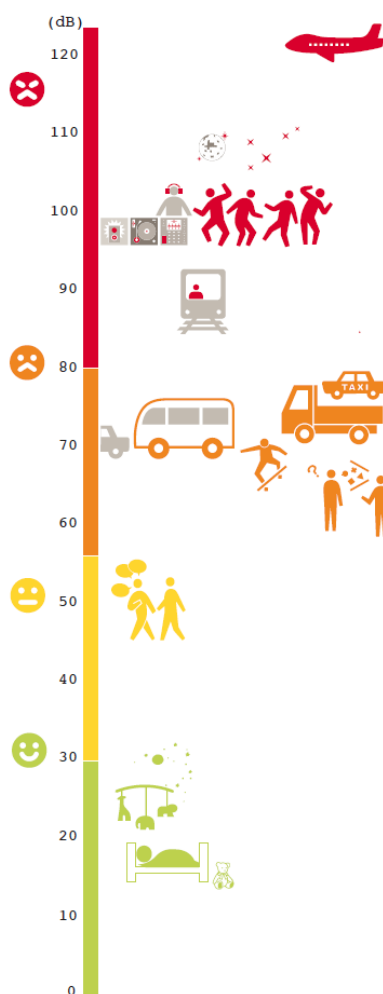
Prilikom obaveznog mjerenja buke u prostorima za smještaj posade i putnika, jedno mjerenje očitava se u sredini prostora. Mikrofon se zatim pomiče horizontalno i/ili vertikalno na udaljenosti 1 m. Ukoliko se u očitanjima primjete razlike veće od 10 dB(A), potrebno je provesti dodatna mjerenja, posebice na razini položaja glave osobe koja leži ili stoji.

Broj kabina u kojima se mjeri buka mora iznositi minimalno 40% ukupnog broja kabina. Kabine koje su neupitno izložene buci, npr. kabine u blizini stojeva, moraju biti uzete u obzir prilikom mjerenja.

Za sva mjerenja primjenjuje se A-ponderiranje rezultata. U slučaju da A-ponderirana razina kontinuiranog zvuka,  $L_{Aeq}(T)$ , prelazi vrijednost 85 dB(A), primjenjuje se C-ponderiranje u svrhu određivanja prikladne zaštite od buke prema HML metodi, a razine zvučnog tlaka očitavaju se u oktavnim pojasevima između 31,5 i 8000 Hz. HML metoda koristi se za odabir adekvatnih zaštitnih slušalica na temelju izmjerenih A i C ponderiranih razina buke. Kratica HML odnosi se na visoke, srednje i niske raspone frekvencija (eng. *high, medium, low*). Proizvođači slušalica navode koliko slušalice umanjuju razine buke (u dB) u navedenim rasponima frekvencija.

## 2.4. Utjecaj buke na zdravlje čovjeka

Dugotrajno izlaganje prekomjernoj buci, kod većine ljudi rezultira trajnim oštećenjem sluha, odnosno povećanjem praga čujnosti. Međunarodna norma ISO 1999:2013 [15] definira slušni hendikep kao dovoljno težak gubitak sluha koji utječe na učinkovitost osobe u aktivnostima svakodnevnog života, u smislu ograničenog razumijevanja uobičajenog govora pri niskim razinama pozadinske buke. Buka u rasponu od 3000 do 6000 Hz ima najveći utjecaj na gubitak sluha. Slika 10 prikazuje tipične razine buke u svakodnevnom životu.



Slika 10. Karakteristične razine buke u svakodnevnom životu [6]

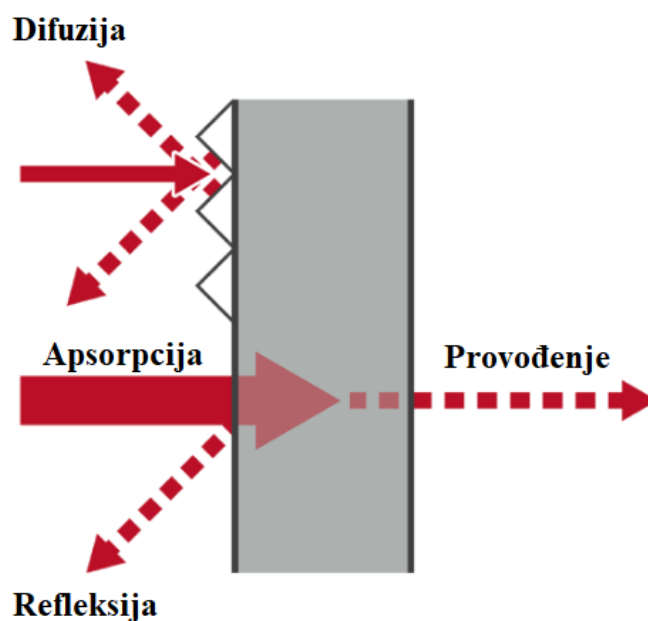
Utjecaj buke primjetan je i uslijed kratkotrajnih izlaganja, a najčešće se manifestira kao loše raspoloženje, umor, nesanica, glavobolja i umanjene kognitivne sposobnosti. Brojna epidemiološka istraživanja pokazala su da 35-40% ljudi koji rade u uredu pokazuju znakove

snažne nelagode pri ekvivalentnim razinama buke od 55 do 60 dB(A). Ako je izvor buke konstantan (npr. sustav ventilacije ili računala), prag izazivanja nelagode može biti i niži od  $L_{Aeq,8h} = 55$  dB(A). U industrijskom okruženju, sličan postotak ljudi koji pokazuju znakove snažne nelagode, javlja se tek pri  $L_{Aeq,8h} > 85$  dB(A) [16].

Važno je imati na umu da ljudi nisu jednako osjetljivi na buku i da navedene vrijednosti nisu nužno primjenjive na cijelu populaciju. Reakcija na stresor ovisi o pojedincu, a može biti psihološka (osjećaj straha, depresije, tuge), bihevioralna (socijalna izolacija, agresija, zloupotreba alkohola, droge, hrane) i somatska (bolesti krvožilnog, probavnog i dišnog sustava). S obzirom da izvori buke na brodu prikazani u prethodnom poglavlju emitiraju visoke razine buke, nužno je adekvatno zaštititi zdravlje posade i putnika čime se izravno utječe na sigurnost broda u cjelini.

## 2.5. Redukcija buke na brodovima – zvučna izolacija

Zvuk se kroz većinu zidova i podova širi pobuđivanjem vibracija u čitavoj konstrukciji. Ove vibracije stvaraju nove zvučne valove smanjenog intenziteta s druge strane plohe na koju nailazi primarni zvučni val. Širenje zvuka kroz konstrukciju u druge prostore, izvan prostora u kojem se nalazi izvor, nazivamo provođenje zvuka. Zvuk se još može apsorbirati i reflektirati, kako je prikazano na Slici 11.



Slika 11. Širenje zvuka [17]

Akustički problemi mogu se otklanjati aktivnim i pasivnim metodama ili njihovim kombinacijama. Aktivne metode koriste dodatne izvore zvučnih valova koji interferiraju sa zvučnim valovima izvora buke. Na brodovima se redovito primjenjuju pasivne metode zaštite od buke koje podrazumijevaju korištenje zvučne izolacije. U nastavku su objašnjeni osnovni pojmovi vezani za zvučnu izolaciju.

Gubitak provođenja ili indeks smanjenja zvuka (oznaka  $R$ ), mjera je učinkovitosti zidova, podova, vrata i drugih barijera u sprječavanju provođenja zvuka. Gubitak provođenja ovisi o frekvenciji i uobičajeno je veći na višim frekvencijama. Mjerna jedinica indeksa smanjenja zvuka je decibel (dB). Što je vrijednost indeksa smanjenja zvuka pregrade veća, to ona bolje funkcionira kao barijera protiv neželjenog provođenja buke.

$$R = 10 \log \left( \frac{P_I}{P_T} \right), \quad (8)$$

gdje je:

$P_I$  – zvučna snaga koja djeluje na zid,

$P_T$  – zvučna snaga koja prolazi kroz zid.

Ponderirani indeks smanjenja zvuka (oznaka  $R_w$ ) je veličina kojom se ocjenjuje zvučna izolacija propisana normom ISO 717-1 [18]. Njegova se vrijednost dobije na temelju usporedbe izmjerene (na terenu ili u laboratoriju) vrijednosti indeksa smanjenja zvuka s referentnom krivuljom, a izražena je u decibelima. S obzirom da se navedena krivulja temelji na frekvencijama koje su svojstvene govoru, ponderirani indeks smanjenja zvuka može se korigirati vrijednostima  $C$  ili  $C_{tr}$  kako bi se obuhvatio veći raspon frekvencija.

*IMO Noise code* [10] propisuje minimalne vrijednosti ponderiranog indeksa smanjenja zvuka, Tablica 2, za pregrade i palube unutar smještajnih prostora, ovisno o tipu prostorija koje pregrađuju:

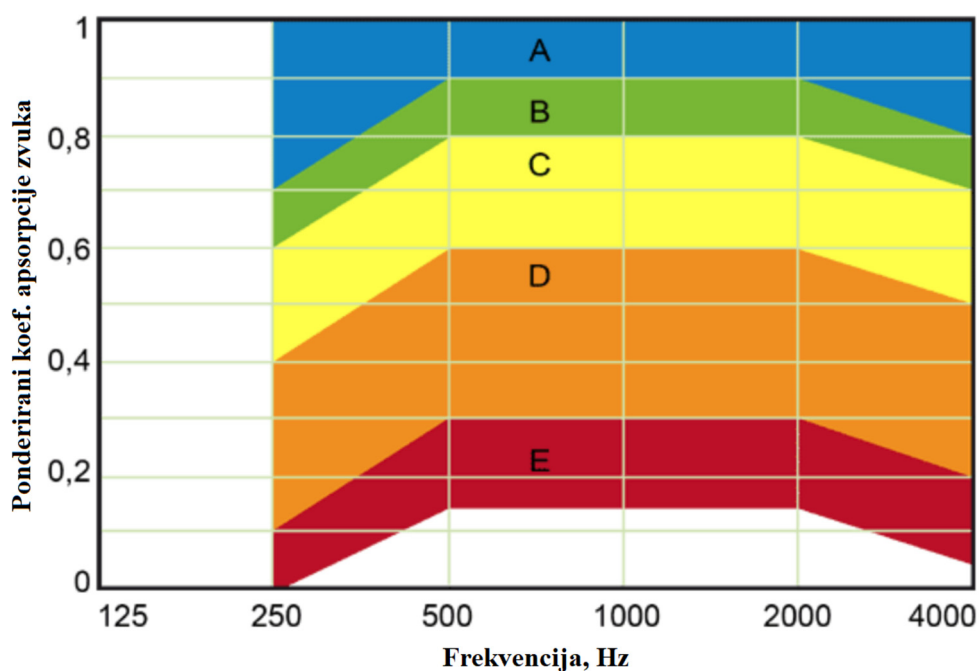
**Tablica 2. Minimalna vrijednost  $R_w$  za pregrade prema [10]**

Između kabina	$R_w = 35$
Između kantina, rekreacijskih prostora, javnih prostora, prostora za zabavu i kabina	$R_w = 45$
Između hodnika i kabina	$R_w = 30$
Između kabina koje su povezane vratima	$R_w = 30$



Izolacijska svojstva materijala još se iskazuju koeficijentom apsorpcije zvuka (oznaka  $\alpha_s$ ). Vrijednost koeficijenta apsorpcije zvuka rezultat je mjerenja koja se, u skladu s normom ISO 354:2003 [19], provode u reverberacijskim komorama. Test se provodi za 18 različitih frekvencija u rasponu od 100 do 5000 Hz. Vrijednost  $\alpha_s$  navodi se za sve frekvencije pri kojima je provedeno mjerenje, a može imati vrijednost između 0 (potpuna refleksija) i 1 (potpuna apsorpcija). Mjerna jedinica za apsorpciju zvuka je sabin, prema američkom fizičaru Wallace Clement Sabine-u koji se smatra ocem arhitektonske akustike. Jedan kvadratni metar materijala koji apsorbira 100% zvuka ima vrijednost jednog metričkog sabina.

Norma ISO 354:2003 [19] ne navodi metodu objedinjavanja rezultata mjerenja na 18 frekvencija u jednu indikativnu vrijednost. Taj je postupak definiran normom ISO 11654:1997 [20], a rezultat je ponderirani koeficijent apsorpcije zvuka (oznaka  $\alpha_w$ ) koji se temelji na usporedbi izmjerenih vrijednosti  $\alpha_s$  s referentom krivuljom. Materijali se na temelju vrijednosti  $\alpha_w$  svrstavaju u kategorije A do E pri čemu materijali klase A imaju najveću, a materijali klase E najmanju sposobnost apsorpcije zvuka, Slika 12.



Slika 12. Kategorije materijala prema vrijednosti  $\alpha_w$  [21]

### 3. ZAKONSKA REGULATIVA U BRODSKOJ AKUSTICI

Negativan utjecaj koji vibracije i buka mogu imati na brodske sustave, zdravlje posade i putnika te okoliš u kojem se brod nalazi, privlače pažnju stručnjaka već nekoliko desetljeća, točnije od 70-ih godina prošlog stoljeća kada je na snagu stupila IMO Rezolucija A.343(IX) [22]. U usporedbi s današnjim regulativama u području buke na brodovima koje su navedene u nastavku poglavlja, Rezolucija A.343(IX) iznosila je isključivo preporuke vezane za mjerenje razina buke. Daljnja istraživanja na području buke i njezinih negativnih učinaka (primarno na posadu i putnike), rezultirala su IMO Rezolucijom A.468(XII) iz 1981. [23]. U odnosu na prethodnu regulativu, ovdje su preciznije definirane metode mjerenja i specifikacije opreme potrebne za mjerenje buke. Nadalje, usvojena je sljedeća kategorizacija brodskih prostora:

1. Radni prostori,
2. Navigacijski prostori,
3. Prostori za smještaj putnika i posade,
4. Uslužni prostori,
5. Prostori u kojima nije uobičajena prisutnost ljudi.

Za navedene glavne grupe prostora na brodu, definirane su podgrupe i pripadajuće dozvoljene razine buke. U slučaju da unatoč primjeni akustičke izolacije u nekim prostorima nije moguće postići zadovoljavajuće razine buke, propisani su načini označavanja tih prostora te korištenje slušalica za ublažavanje buke. Također je definiran predložak za izradu izvještaja nakon provedenog mjerenja buke na brodu. S obzirom na navedeno, može se zaključiti kako je prihvaćanjem Rezolucije A.468(XII) ostvaren značajan napredak na području zaštite posade i putnika od buke na brodovima.

Rezolucije A.343(IX) i A.468(XII) poslužile su kao temelj za IMO Rezoluciju MSC.337(91): 2014 pod nazivom „Code on noise levels on board ships“ [10], tzv. *IMO Noise Code*. Ova Rezolucija stupila je na snagu 1. srpnja 2014. godine. U Tablici 3 uspoređene su maksimalne razine buke prema Rezolucijama A.468(XII) i MSC-337(91).

**Tablica 3. Usporedba dopuštenih razina buke u dB(A) prema Rezolucijama A.468(XII) i MSC-337(91)**

IMO A.468(XII)		MSC-337(91)		
Prostori na brodu	VELIČINA BRODA	Prostori na brodu	VELIČINA BRODA	
	≥ 1600 GT		1600 do 10000 GT	≥ 10000 GT
RADNI PROSTORI				
Prostori sa strojevima (redovita prisutnost ljudi)	90	Prostori sa strojevima	110	110
Prostori sa strojevima (neredovita prisutnost ljudi)	110			
Prostori za upravljanje strojevima	75	Prostori za upravljanje strojevima	75	75
Radionice	85	Radionice koje nisu dio prostora sa strojevima	85	85
Nedefinirani radni prostori	90	Nedefinirani radni prostori	90	85
NAVIGACIJSKI PROSTORI				
Navigacijski most i prostorije s kartama	65	Navigacijski most i prostorije s kartama	65	65
Slušne postaje, krila navigacijskog mosta i prozori	70	Izvidničke postaje, krila navigacijskog mosta i prozori	70	70
Radio sobe	60	Radio sobe	60	60
Prostorije s radarima	65	Prostorije s radarima	65	65
PROSTORI ZA SMJEŠTAJ PUTNIKA I POSADE				
Kabine i bolničke prostorije	60	Kabine i bolničke prostorije	60	55
Kantine	65	Kantine	65	60
Prostori za rekreaciju	65	Prostori za rekreaciju	65	60
Otvoreni rekreacijski prostori	75	Otvoreni rekreacijski prostori	75	75
Uredi	65	Uredi	65	60
USLUŽNI PROSTORI				
Kuhinje, u kojima oprema za obradu hrane nije u funkciji	75	Kuhinje u kojima oprema za obradu hrane nije u funkciji	75	75
Plohe za posluživanje hrane i ostave	75	Plohe za posluživanje hrane i ostave	75	75
PROSTORI U KOJIMA NIJE UOBIČAJENA PRISUTNOST LJUDI				
Nedefinirani prostori	90	Nenavedeni prostori s mogućnošću izlaganja visokoj buci	90	90

Najveći dio promjena odnosi se na prostore za smještaj putnika i posade i to na brodovima većim od 10000 GT, što je u skladu s ciljem IMO-a koji ovom regulativom nastoji pružiti pravila i smjernice klasifikacijskim društvima s ciljem ograničavanja štetnih utjecaja buke na posadu i putnike.

Povećanje interesa za putničke brodove i brodove za kružna putovanja potaknulo je klasifikacijska društva da naprave dodatan korak u području zaštite od buke i vibracija uvođenjem tzv. klasa udobnosti (eng. *Comfort Class*). Prvo klasifikacijsko društvo koje je uvelo klase udobnosti u svoja pravila bilo je *DNV-GL*, u siječnju 2011. godine. Ubrzo nakon toga, društva *LR* i *BV* uvela su i svoje interpretacije klasa udobnosti u vlastita pravila. Općenito, zahtjevi klasa udobnosti odnose se na razine buke, vibracija i kvalitetu klime na brodu i strožiji su u odnosu na standardne sigurnosne zahtjeve. Brodovi koji zadovoljavaju uvjete klasa udobnosti predstavljaju ugodnije okruženje za boravak putnika i posade. U slučaju posade to je važno radi ublažavanja štetnih utjecaja buke na radnu sposobnost čime se smanjuje mogućnost ozljede i povećava sigurnost broda u cjelini. S aspekta brodovlasnika, zadovoljavanje klase komfora ima marketinški značaj s obzirom da putnicima mogu ponuditi ugodnije iskustvo putovanja.

S obzirom da se klase udobnosti u najvećoj mjeri primjenjuju na putničkim brodovima, detaljnija analiza i usporedba različitih klasa udobnosti prema klasifikacijskim društvima nije obuhvaćena ovim radom.

U nastavku su navedene i ukratko opisane međunarodne norme koje se primjenjuju u brodskoj akustici:

- ISO 226:2003: specificira kombinacije razina zvučnog tlaka i frekvencija kontinuiranih tonova koje ljudsko uho percipira kao jednako glasne. Specifikacije vrijede za sljedeće uvjete: zvučno se polje, u odsutnosti slušatelja, sastoji od slobodnih ravninskih progresivnih valova; izvor zvuka nalazi se ispred slušatelja; zvučni signali sastoje se od čistih tonova; razina zvučnog tlaka mjeri se u središtu glave slušatelja (bez njegove prisutnosti); slušanje je binauralno; slušatelji su otološki normalne osobe u dobi od 18 do 25 godina [7].

- ISO 354:2003: opisuje metode mjerenja koeficijenta apsorpcije zvuka akustičkih materijala koji se koriste za tretiranje zidova i stropova, u reverberacijskoj prostoriji. Rezultati dobiveni u skladu s ovom normom mogu se uspoređivati i koristiti za akustičke proračune [19].
- ISO 11654:1997: opisuje metodu izračunavanja ponderiranog koeficijenta apsorpcije zvuka  $\alpha_w$  na temelju usporedbe izmjerenih vrijednosti koeficijenta apsorpcije  $\alpha_s$  s referentnom krivuljom [20].
- ISO 1999:2013: opisuje metodu za proračun trajnog, bukom izazvanog, gubitka sluha u odrasloj populaciji uslijed različitih razina buke i različitih perioda izloženosti [15].
- ISO 2923:1996-12: opisuje metode i uvjete za mjerenje buke na brodovima. Dobiveni rezultati mogu se koristiti za uspoređivanje različitih plovila, pri ispitivanjima prihvatljivosti za usporedbu s nacionalnim i međunarodnim zakonima, nadzor brodova i kao osnova za daljnja istraživanja [24].
- ISO 80000-8:2007: ova norma sadrži nazive, simbole, jedinice i definicije veličina koje se koriste u akustici. Gdje je potrebno, navedeni su i faktori za pretvorbu [25].
- IEC 61672-1:2013: navodi specifikacije za elektroakustičke radne karakteristike triju tipova mjernih instrumenata za mjerenje zvuka, [8]:
  1. Zvukomjeri za vremensko ponderiranje koji mjere eksponencijalne, vremenski ponderirane i frekvencijski ponderirane razine zvuka,
  2. Integrirajući zvukomjeri koji mjere vremenski uprosječene, frekvencijski ponderirane razine zvuka,
  3. Integrirajući zvukomjeri koji mjere frekvencijski ponderirane vrijednosti izloženosti zvuku.

Instrumenti specificirani ovom normom namjenjeni su za mjerenje zvuka u rasponu ljudskog sluha. Navode se dvije kategorije izvedbe, klasa 1 i klasa 2. Zvukomjeri klase 1 omogućuju mjerenje buke u širem rasponu frekvencija i općenito imaju strože tolerancije u odnosu na manje precizne zvukomjere klase 2. Ova norma primjenjiva je na različite konstrukcije zvukomjera.

- IEC 61672-2:2013+AMD1:2017 CSV: daje pojedinosti o ispitivanjima koje je obvezno provesti za utvrđivanje sukladnosti uređaja za mjerenje zvuka sa specifikacijama koje su navedene normom IEC 61672-1. Metode ispitivanja opisane ovom normom primjenjive su na zvukomjere klase 1 i 2, [26]. Cilj je da svi laboratoriji koriste jednake metode pri ispitivanju uređaja za mjerenje zvuka.
- IEC 61672-3:2013: opisuje postupke za periodična ispitivanja zvukomjera klase 1 i 2 koji su definirani normom IEC 61672-1. Cilj norme je osigurati da svi laboratoriji provode periodična ispitivanja na jednak način, [27]. Svrha periodičnih ispitivanja je dati korisniku uvjerenje da je uređaj u skladu sa specifikacijama navedenim u normi IEC 61672-1 za određen skup ključnih ispitivanja, za propisane uvjete u kojima se ispitivanja provode.
- IEC 61260-1:2014: definira zahtjeve koji se odnose na radne karakteristike analogno prikupljenih podataka i digitalnu implementaciju pojasnopropusnih filtera [13]. Raspon propusnog pojasa relativne prigušne karakteristike jednak je konstantnom postotku točne srednje frekvencije pojasa za sve filtere za zadanu pojasnu širinu. Instrument koji udovoljava zahtjevima ove norme može sadržavati bilo koji broj susjednih pojasnopropusnih filtera koji pokrivaju željeni raspon frekvencija. Zahtjevano radne karakteristike dane su za filtere klase 1 i klase 2. Specifikacije za klasu 1 i 2 imaju isti konstrukcijski cilj i uglavnom se razlikuju u granicama prihvatljivosti i rasponu radnih temperatura. Granice prihvatljivosti uređaja klase 2 veći su, ili jednaki granicama za klasu 1. Pojasnopropusni filteri koji udovoljavaju zahtjevima ove norme mogu biti sastavni dio raznih mjernih sustava ili integralne komponente određenog instrumenta kao što je analizator spektra.
- IEC 61260-2:2016+AMD1:2017 CSV: sadrži pojedinosti o ispitivanjima koja je nužno provesti za potvrdu sukladnosti oktavnih filtera sa specifikacijama iz norme IEC 61260-1:2014, [28].
- IEC 61260-3:2016: opisuje postupke za periodična ispitivanja oktavnih filtera klase 1 i 2 koji su definirani normom IEC 61672-1. Cilj norme je osigurati da svi laboratoriji provode periodična ispitivanja na jednak način [29].

- ISO 20283-3:2006: navodi smjernice, zahtjeve i postupke za mjerenje vibracija generiranih radom brodske opreme prilikom tvorničkog ispitivanja opreme [30]. Norma zahtjeva provođenje testiranja u strogo definiranim radnim uvjetima. Primjenjuje se za brodsku opremu namijenjenu za putničke i trgovačke brodove te jahte i brze brodove.
- ISO 717-1:2013: jednoznačno definira vrijednosti zvučne izolacije od prostorne buke u zgradama, odnosno građevnih elemenata kao što su zidovi, podovi, vrata i prozori [18]. Pri tome su u obzir uzeti različiti dijelovi spektra zvuka od izvora unutar i izvan zgrade (npr. promet).
- ISO 717-2:2013: jednoznačno definira vrijednost izolacije od udarne buke u zgradama te za podove. Daje pravila za određivanje navedenih vrijednosti na temelju rezultata mjerenja provedenih u trećinsko-oktavnom ili oktavnom pojasu [31].

## 4. PRORAČUNSKE METODE ZA ANALIZU BUKE

Kao što je prethodno objašnjeno, zvuk se od izvora prema prijemniku širi različitim putevima. Na niskim frekvencijama taj se prijelaz ostvaruje kao rezultat membranskih vibracija konstrukcije dok na visokim frekvencijama ima valni karakter. Nadalje, zvuk se može prenositi kroz temelje strojeva i konstrukciju trupa u susjedne i udaljene prostore. U slučaju strojeva kod kojih se energija vibracija manifestira u obliku zvučnih vibracija (pumpe, kompresori, dizelski motori), buka u susjednim prostorima primarno je rezultat širenja zvuka zračnim putem. Pojava buke u prostorima udaljenim od izvora gotovo se uvijek može objasniti širenjem zvučnih vibracija kroz konstrukciju trupa [32].

Buka nastala širenjem zvučnih vibracija kroz konstrukciju predstavlja odziv konstrukcije s frekvencijom iznad 1000 Hz [32]. Buka i vibracije su srodan fenomen, ali se nalaze na suprotnim stranama frekvencijskog spektra. S obzirom da se problem vibracija niskih frekvencija tradicionalno rješava numeričkim metodama, kao npr. metodom konačnih elemenata, ista se čini kao logični odabir za rješavanje problema visokih frekvencija, tj. buke. Ipak, za analizu buke potrebna je značajno finija mreža konačnih elemenata što dodatno komplicira analizu i iziskuje značajno snažnija računala. Metoda hibridne statističke analize energije, koja se počela razvijati 60-ih godina prošlog stoljeća, pokazala se vrlo pouzdanom u predviđanjima buke visokih frekvencija i danas je dostupno nekoliko komercijalnih programskih paketa koji se na njoj temelje. Valja još spomenuti i metodu energetske konačnih elemenata koja spada u novije metode koje se primjenjuju u akustici.

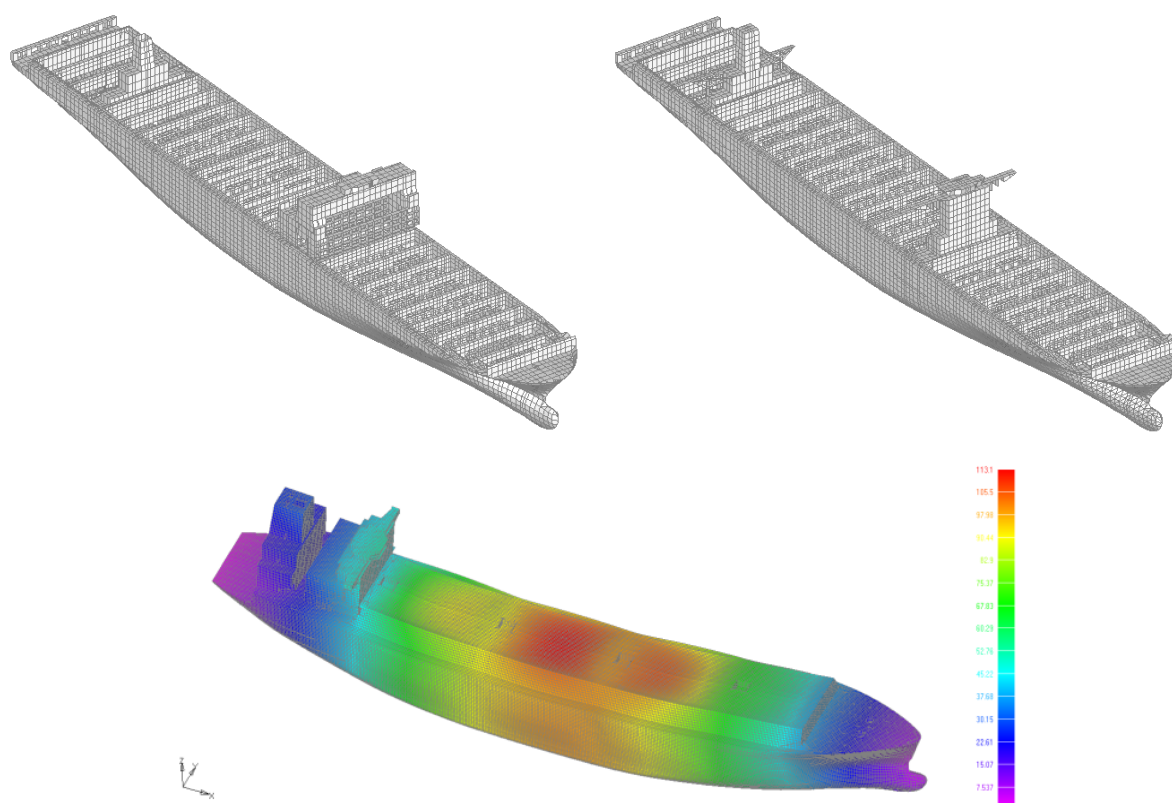
Važno je napomenuti da niti jedna od navedenih metoda nije u potpunosti pouzdana za analizu problema u domeni srednjih frekvencija [33].

### 4.1. Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata (MKE) najzastupljeniji je alat za određivanje vibro-akustičnih značajki brodskih konstrukcija. Ipak, nedostatak MKE u analizi propagacije buke na brodovima je potreba velikih računalnih resursa kako bi se došlo do visokih vlastitih frekvencija konstrukcije. Naime, korištenje mreže konačnih elemenata koja je prikladna za



analizu vibracija, Slika 13, nije pogodno za analizu buke jer je potrebna vrlo fina mreža koja može na odgovarajući način reproducirati vrlo visoke vlastite oblike vibriranja konstrukcije. Spomenuta ograničenja su pridonijela razvoju novih metoda u predviđanju buke.



**Slika 13. Primjer tipičnih mreža konačnih elemenata za analize vibracija brodskih konstrukcija**

#### 4.2. Metoda energetske konačne elemente

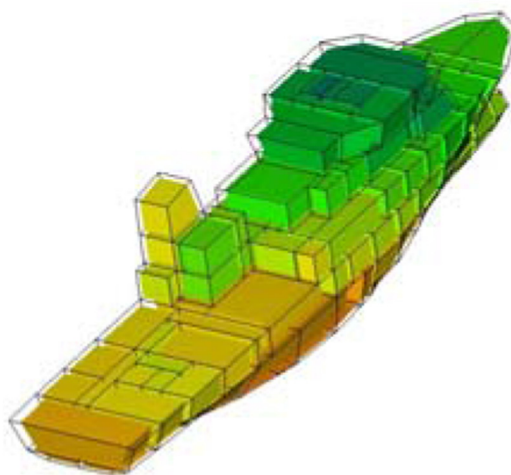
Metoda energetske konačne elemente (MEKE) je novija metoda za proračun vibracija visokih frekvencija složenih konstrukcija. U ovoj se metodi formulira energetska bilanca za diferencijalni dio elementa čime se dobije parcijalna diferencijalna jednačina drugog reda u kojoj je varijabla gustoća energije spojenih elemenata. Za rješavanje dobivenih jednačini koristi se metoda konačnih elemenata [34].

Glavna prednost ove metode je mogućnost modeliranja brodske konstrukcije s relativno grubom mrežom konačnih elemenata. Ideja je da se za proračun buke koristi isti model koji se

u projektnoj fazi koristi za proračun čvrstoće brodske konstrukcije. Ovakav pristup čini MEKE vrlo isplativom metodom za analizu propagacije buke kroz složene brodske konstrukcije [32].

#### 4.3. Metoda hibridne statističke analize energije

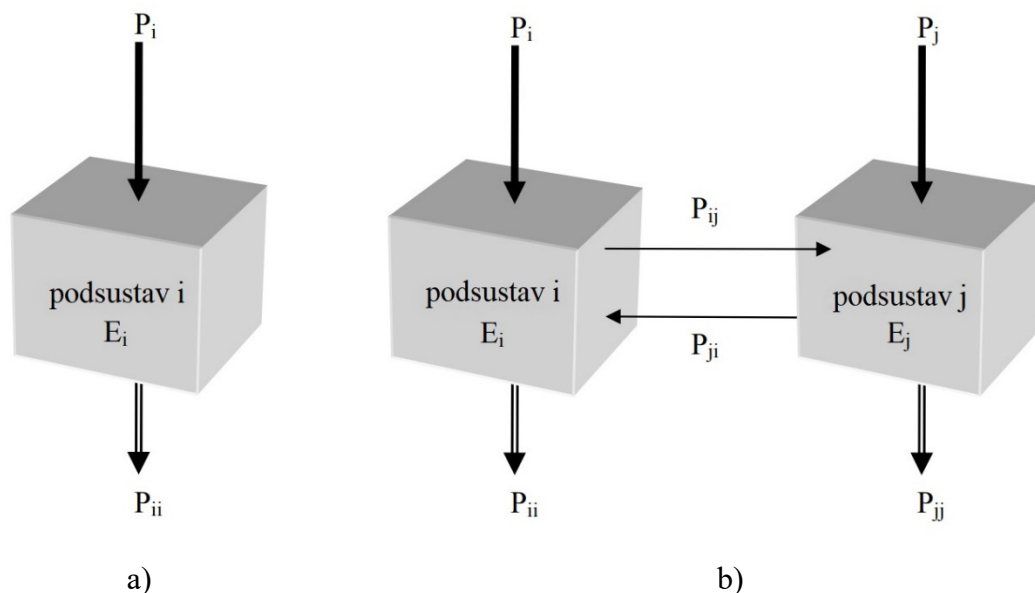
Metoda hibridne statističke analize energije ima dugu tradiciju u analizi akustičkih problema (od 60-ih godina prošlog stoljeća) i temelji se na disipaciji energije, pri čemu se varijable određuju statistički, a svi rezultati predstavljaju očekivane vrijednosti. U brodogradnji je također zastupljena duži niz godina, pa danas na tržištu postoji nekoliko validiranih alata koji omogućuju pouzdanu prognozu buke na brodovima, Slika 14. Glavna ideja ove metode je podjela analizirane konstrukcije na podsustave te modeliranje toka energije između njih [34]. Jednadžbe energetske ravnoteže postavljaju se za sve podsustave s obzirom na njihove prostorno uprosječene razine vibracija, brzinu disipacije energije, brzinu izmjene energije i brzinu unosa energije uslijed vanjskih sila [32].



**Slika 14. Primjer modela broda za analizu hibridnom statističkom analizom energije**

Ako razmatramo jedan podsustav, bilo koja uzbuda koja djeluje na podsustav može se prikazati kao unos snage  $P_i$ , Slika 15, čime se u podsustavu pohranjuje vibracijska energija  $E_i$ . Gubitak snage  $P_{ii}$  povezan je s pohranjenom energijom preko faktora gubitka prigušenja  $\eta_i$ :

$$P_{ii} = \omega \eta_i E_i \quad (9)$$



Slika 15. Podsustav (a) i dva spregnuta podsustava (b) [34]

Uz pretpostavku da je analiza ograničena na stacionarno stanje, unos snage jednak je gubitku snage:

$$P_i = P_{ii} \quad (10)$$

Ukoliko postoji drugi podsustav koji je povezan s prvim podsustavom, također vrijedi ravnoteža ulazne i izlazne snage. Ako su dva podsustava spregnuta, oni dijele vibracijsku energiju, odnosno između njih postoji tok energije, Slika 15. S aspekta podsustava „i“, tok  $P_{ij}$  predstavlja gubitak energije, a tok  $P_{ji}$  predstavlja unos energije. Isto vrijedi za podsustav „j“.

$$P_{ij} = \omega \eta_{ij} E_i \quad (11)$$

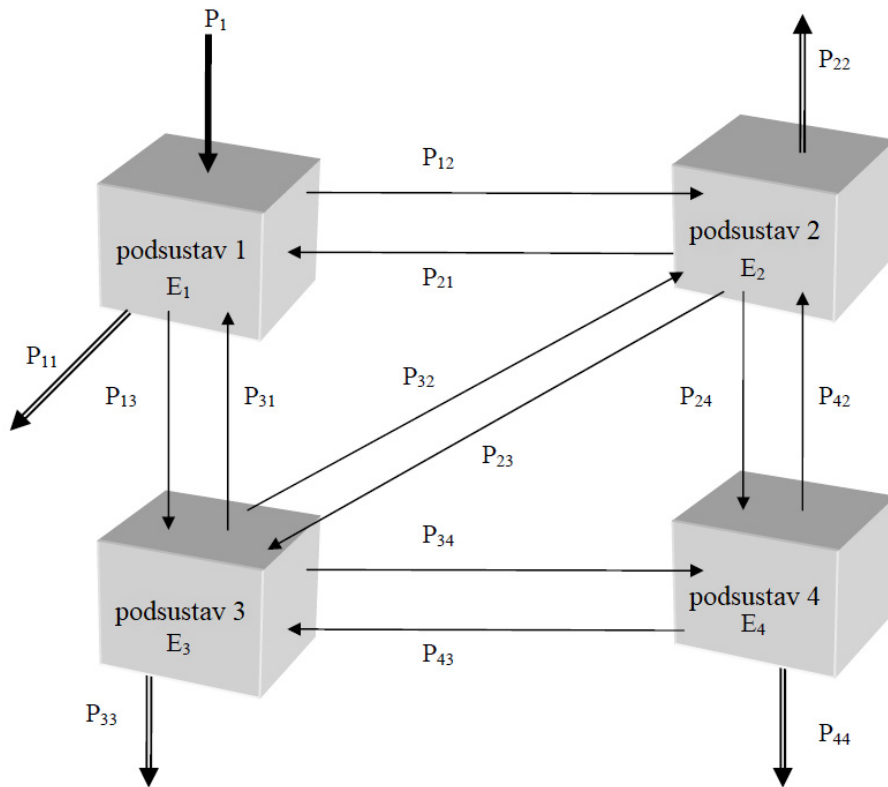
Slika 16 prikazuje četiri spregnuta podsustava, pri čemu snaga ulazi u prvi podsustav. Ova ulazna snaga jednaka je zbroju svih gubitaka (uslijed disipacije i sprežanja) u cijelom sustavu, a umanjena je za snagu koja dolazi iz podsustava 2 i 3. Slijede jednadžbe ravnoteže u sustavu:

$$P_1 = P_{11} + P_{12} + P_{13} - P_{21} - P_{31} \quad (12)$$

$$0 = P_{22} + P_{21} + P_{23} + P_{24} - P_{12} - P_{32} - P_{42} \quad (13)$$

$$0 = P_{33} + P_{31} + P_{32} + P_{34} - P_{13} - P_{23} - P_{43} \quad (14)$$

$$0 = P_{44} + P_{42} + P_{43} - P_{24} - P_{34} \quad (15)$$



Slika 16. Četiri spregnuta podsustava [34]

Uvrštavanjem jednadžbi ravnoteže u jednadžbe (9) i (11) dobije se:

$$\omega \begin{pmatrix} \eta_{11} & -\eta_{21} & -\eta_{31} & -\eta_{41} \\ -\eta_{12} & \eta_{22} & -\eta_{32} & -\eta_{42} \\ -\eta_{13} & -\eta_{23} & \eta_{33} & -\eta_{43} \\ -\eta_{14} & -\eta_{24} & -\eta_{34} & \eta_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

Elementi na dijagonali matrice faktora gubitaka zovu se faktori ukupnog gubitka s obzirom da predstavljaju sumu svih faktora gubitaka sprezanja koji utječu na gubitak snage u podsustavu:

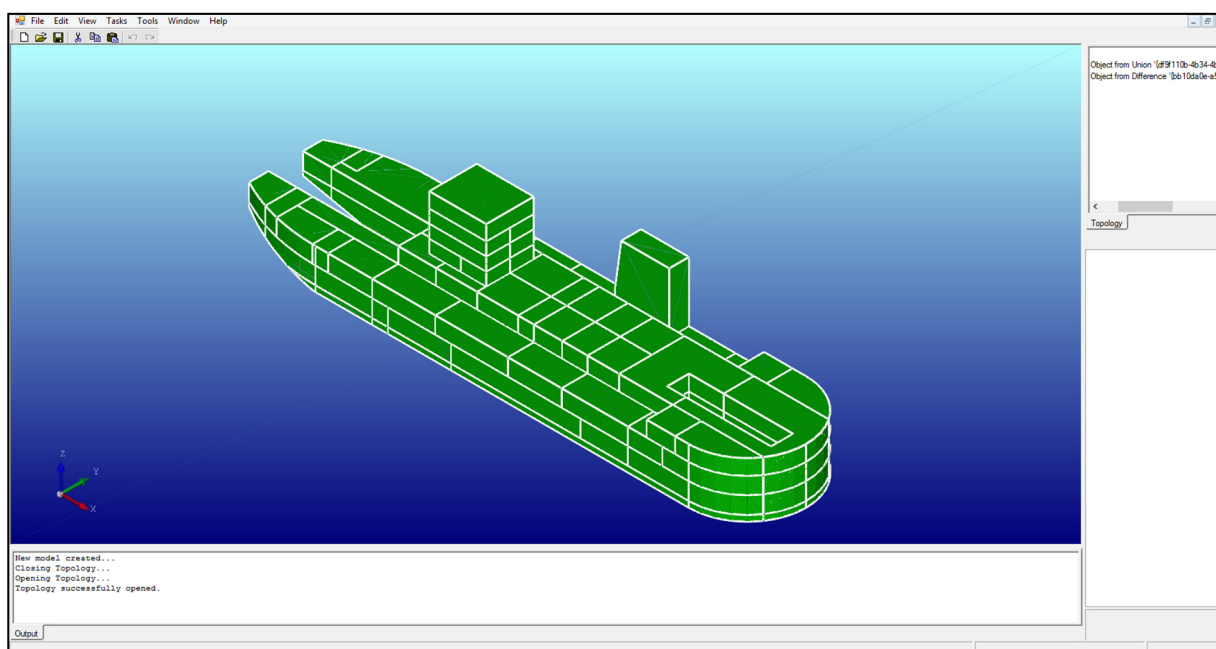
$$\eta_{ii} = \eta_i + \sum_{j, j \neq i} \eta_{ij} \quad (17)$$

Metoda statističke analize energije validirana je za rješavanje problema buke u području brodogradnje i na njoj se temelji nekoliko komercijalnih programskih paketa. Jedan od njih je *Designer-NOISE* koji je korišten za analizu u okviru ovog rada. U novije vrijeme poseban istraživački izazov predstavlja tzv. buka srednjih frekvencija, pri čemu se nastoji razviti hibridne metode kombinirajući metodu konačnih elemenata (dovoljno točna za niže frekvencije) i statističku analizu energije (dovoljno točna za visoke frekvencije), [35].

## 5. OPIS KORIŠTENE PROGRAMSKE PODRŠKE

Programski paket *Designer-NOISE* razvijen je za brzo i precizno predviđanje razina buke na brodovima i u ostalim tankostjenim konstrukcijama s ukrepljenim panelima. Razina buke po oktavnim pojasevima i ukupna A-ponderirana razina buke računa se na temelju propagacije zvuka od strojeva, brodskog vijka i udara valova zračnim putem te kroz konstrukciju [36].

*Designer-NOISE* koristi 3-D grafičko korisničko sučelje za izradu i definiranje parametara modela, Slika 17.



Slika 17. Grafičko korisničko sučelje u *Designer-NOISEu*

Rješavač koristi metodu hibridne statističke analize energije za predviđanje širenja buke kroz brodsku konstrukciju. Za predviđanje širenja buke zrakom, primjenjuje metode arhitektonske akustike. Moguće je modelirati gotovo sve izvore buke, a unos podataka nužnih za proračun vrlo je jednostavan, Slika 18. Također je moguća analiza buke uslijed rada sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije, a dobiveni rezultati mogu se kombinirati s

rezultatima proračuna buke od strojeva. Važno je napomenuti da je za sve odjeljke na brodu moguć uvid u razine buke od pojedinih izvora.

Identity	
Name	
Source ID	51
Base Element ID	479
Compartment ID	45
Is Active?	True
Source Type	Machinery
Library Source	None

Parameters - Coordinate System	
Foundation Origin	{ 36.325 ,2.140 ,1.300 } m
Local X-axis	{ 1.000 ,0.000 ,0.000 } m
Local Z-Axis	{ 0.000 ,0.000 ,1.000 } m
Rotation Angle	0.0

Parameters - Noise	
Source Length	1.000 m
Source Width	1.000 m
Source Height	1.000 m
Source R	1.000 m
Source Noise Levels	0,0,0,0,0,0,0,0
Airborne Source Offset	{ 0.0 ,0.0 ,0.0 } mm

Parameters - Vibration	
Mass	0.000 kg
Source Vibration Levels	0,0,0,0,0,0,0,0
Foundation Length	1.000 m
Foundation Width	1.000 m
Foundation R0	1.000 m
Source Data Type	AboveMount
Mounting Type	Hard

Source Element	
Type of Base Element	StandardDeck
Large Panel Length	0.0 mm
Large Panel Width	0.0 mm
Stiffener Moment of Inertia	0.0 cm <sup>4</sup>

**Name**  
User assigned source name.

Accept Cancel

Slika 18. Korisničko sučelje za zadavanje parametara izvora buke

Korisniku su na raspolaganju različite metode sanacije buke kao što su elastično temeljenje strojeva i uređaja te dodavanje akustičke izolacije (slojevi i izolacijske ploče). Tablica 4 prikazuje konstrukcijske materijale koji su dostupni u bazi podataka programskog paketa, a neki od navedenih materijala mogu se koristiti i za definiranje izolacijskih ploča. Dostupni izolacijski slojevi navedeni su u Tablici 5, a Tablica 6 prikazuje vrijednosti koeficijenata apsorpcije zvuka za apsorpcijske materijale u bazi podataka. Osim materijala dostupnih unutar samog programa, korisnik ima mogućnost definiranja vlastitih izolacijskih materijala. Izbornik za definiranje izolacijskih materijala na elementu prikazan je na Slici 19.

Coverings/Treatments for Element 225

### Joiner Panels

#### Engine Room

Pre-Defined Arrangement	None
Gap Spacing	100.0 mm
Is Hard Mounted?	False
Has Absorption?	True
Panel Thickness	25.0 mm
Panel Type	High_Transmission_Loss

**Pre-Defined Arrangement**  
Type of joiner panel arrangement

#### Pump Room

Pre-Defined Arrangement	None
Gap Spacing	0.0 mm
Is Hard Mounted?	False
Has Absorption?	False
Panel Thickness	0.0 mm
Panel Type	None

**Pre-Defined Arrangement**  
Type of joiner panel arrangement

### Layer

Layer Material	MIL_PRF_23653C_Class
Thickness Ratio	2.0

**Layer Material**  
Layer materials are directly attached to the base element. Changes to damping loss factor, mass, and stiffness will result.

### Absorptive Insulation

#### Engine Room

Area	55.100 m <sup>2</sup>
Density	50 kg/m <sup>3</sup> (3 pcf)
Material Type	DOD_I_24688_I_50mm
Thickness	50.0 mm

**Area**  
Area of element covered by absorptive insulation

#### Pump Room

Area	55.100 m <sup>2</sup>
Density	50 kg/m <sup>3</sup> (3 pcf)
Material Type	DOD_I_24688_I_50mm
Thickness	50.0 mm

**Area**  
Area of element covered by absorptive insulation

☐ User Defined Treatments

Accept
Cancel

Slika 19. Korisničko sučelje za zadavanje izolacijskih materijala

Tablica 4. Konstrukcijski materijali u bazi podataka [12]

Materijal	Konstrukcijski materijal	Materijal za izolacijske ploče	Modul elastičnosti, GPa	Gustoća, kg/m <sup>3</sup>	Poissonov omjer
Čelik	da	da	210	7800	0.29
Aluminij	da	da	72	2800	0.3
Titan	da	da	120	4500	0.32
Stakloplastika	da	da	21	1700	0.25
Kompozitna ploča	ne	da	/	Proizvoljno	/
HTL	ne	da	/	1780	/
Drvo	ne	da	12	500	0.35
Pleksiglas	ne	da	43	1200	0.4
Šperploča	ne	da	3.4	800	0.35
Plastika	ne	da	13	1400	0.3
Marinite	ne	da	3	800	0.3
Aluminijski sendvič	ne	da	72	2800	0.3



**Tablica 5. Izolacijski slojevi u bazi podataka [12]**

Materijal	Debljina sloja, mm
<i>MIL-PRF-23653C Class 2</i>	0.2 do 2 puta debljina elementa
<i>Mascoat Delta dB sprej</i>	0.2 do 1.25 puta debljina elementa
<i>EAR C1002</i> prigušne ploče	1 do 1.5 puta debljina elementa
Lateks beton	25 ili 50
Vinilne ploče	2
Termoizolirajuća čvrsta pjena	25 ili 50

**Tablica 6. Koeficijenti apsorpcije zvuka apsorpcijske izolacije u bazi podataka [12]**

Materijal	Debljina, mm	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
<i>MIL-I-742 Type I</i>	25	0.15	0.7	0.98	0.5	0.22	0.08	0.07
<i>MIL-I-742 Type I</i>	50	0.6	1.1	0.84	0.46	0.25	0.13	0.12
<i>MIL-A-23054</i>	25	0.36	0.93	1.18	1.11	0.96	0.87	0.85
<i>MIL-I-2203 Type III</i>	50	0.52	1	1	0.88	0.56	0.31	0.25
<i>DOD-I-24688 Type I</i>	25	0.15	0.27	0.65	1	0.94	0.9	0.95
<i>DOD-I-24688 Type I</i>	50	0.28	0.55	1	0.98	0.88	0.93	0.96
<i>DOD-I-24688 Type II</i>	25	0.09	0.31	0.87	0.87	0.95	0.96	0.97
<i>DOD-I-24688 Type II</i>	50	0.27	0.81	1	0.97	1	0.98	0.99

Primjenom raspoloživih metoda sanacije moguće je vrlo brzo zadovoljiti akustičke ciljeve uz minimalan utjecaj na slobodan prostor, masu i cijenu broda [36]. Deklarirana točnost rezultata programskog paketa je unutar 3 dB za A-ponderirane razine buke.

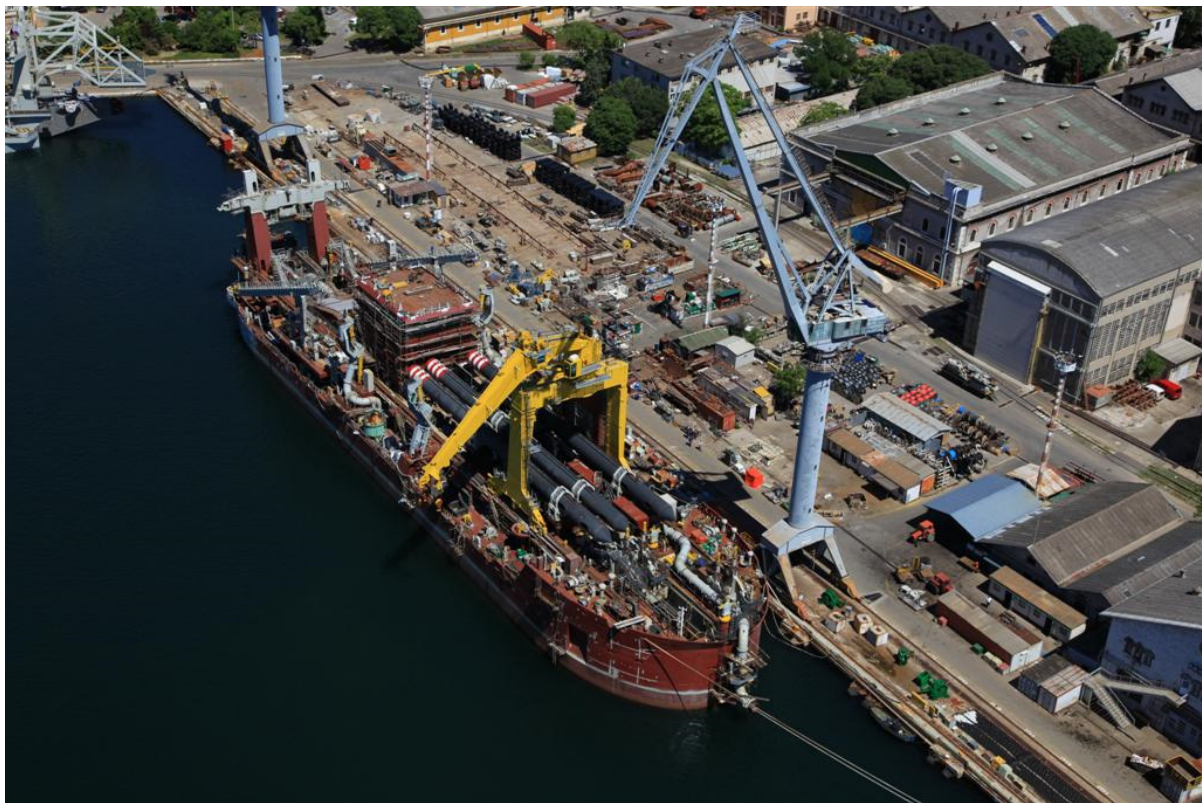
## 6. TEHNIČKI PODACI ANALIZIRANOG BRODA I IZVORA BUKE

### 6.1. Tehničke značajke broda

U ovom diplomskom radu provedena je prognoza buke za jaružalo na vlastiti pogon, Slike 20 i 21, izgrađeno u brodogradilištu Uljanik iz Pule (Gr. 480), u klasi klasifikacijskog društva *Bureau Veritas*, i to za dva uobičajena operativna režima; jaružanje (osnovni eksploatacijski režim) i plovidba.

Osnovne dimenzije i značajke jaružala su sljedeće:

Duljina preko svega:	138,5	m
Duljina između okomica:	110,5	m
Širina:	26,0	m
Gaz:	5,5	m
Nosivost:	2200	t
Dubina jaružanja:	35	m
Snaga potopljenih pumpi:	4250	kW
Snaga unutarnjih pumpi:	2 x 5000	kW
Snaga kopača:	7000	kW
Snaga propulzije:	2 x 3500	kW
Ukupna instalirana snaga dizelskih motora:	23520	kW
Brzina:	13	čv
Broj članova posade:	46	

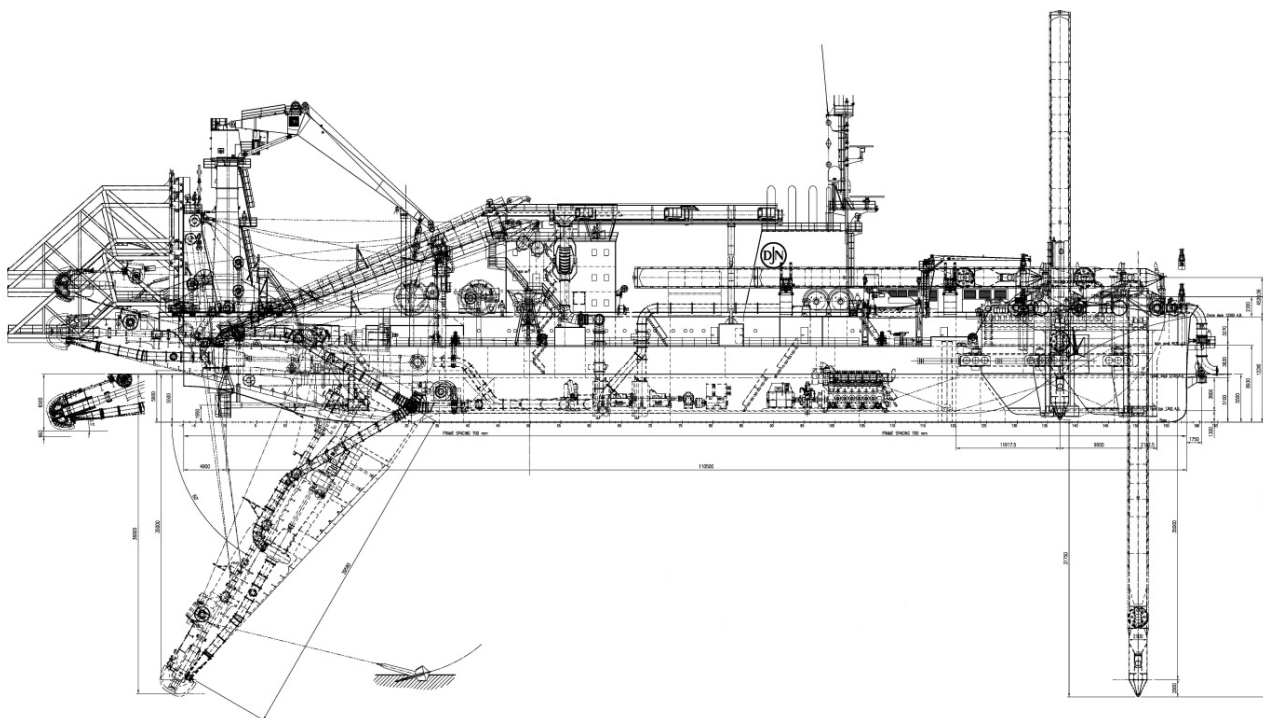


**Slika 20. Jaružalo na vlastiti pogon u fazi opremanja**



**Slika 21. Jaružalo na vlastiti pogon u plovidbi**

Opći plan analiziranog broda prikazan je na Slici 22, dok su osnovni nacrti prikazani u Prilogu I.



Slika 22. Opći plan analiziranog jaružala na vlastiti pogon

## 6.2. Izvori buke na jaružalu

Aktivni izvori buke ovise o eksploatacijskom režimu rada broda. U nastavku su prikazani glavni izvori buke za analizirani brod u režimu jaružanja i plovidbe. Također su navedene razine buke po srednjim oktavnim frekvencijama za glavne izvore buke, Tablice 7-14.

Aktivni izvori buke u režimu jaružanja:

- Glavni motori, 3 komada,
- Reduktori glavnih motora, 3 komada,
- Pumpe za jaružanje, 2 komada,
- Reduktori pumpi za jaružanje, 2 komada,
- Vitla za bočnu užad, 2 komada,
- Vitla za podizanje kopača, 2 komada,
- Ventilatori strojarnice, 4 komada,
- Vanjska jedinica klimatizacije, 1 komad.

Aktivni izvori buke u režimu plovidbe:

- Glavni motori, 2 komada,
- Reduktori glavnih motora, 2 komada,
- Ventilatori strojarnice, 4 komada,
- Vanjska jedinica klimatizacije, 1 komad,
- Vijci, 2 komada.
- Reduktori vijaka, 2 komada.

**Tablica 7. Razine buke glavnih motora**

Srednje oktavne frekvencije, Hz								
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Buka koja se širi zrakom, dB								
104	105	107	109	108	108	107	104	102
Buka koja se širi konstrukcijom, dB								
79	80	78	80	79	73	68	59	41

**Tablica 8. Razine buke reduktora glavnih motora**

Srednje oktavne frekvencije, Hz								
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Buka koja se širi zrakom, dB								
98	99	101	100	99	98	97	96	84
Buka koja se širi konstrukcijom, dB								
80	86	87	89	88	88	86	84	78

**Tablica 9. Razine buke pumpi za jaružanje**

Srednje oktavne frekvencije, Hz								
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Buka koja se širi zrakom, dB								
89	89	90	91	92	94	90	88	87
Buka koja se širi konstrukcijom, dB								
88	88	89	85	85	85	86	73	62

**Tablica 10. Razine buke reduktora pumpi za jaružanje**

Srednje oktavne frekvencije, Hz								
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Buka koja se širi zrakom, dB								
89	86	87	87	88	90	87	84	86
Buka koja se širi konstrukcijom, dB								
86	87	88	90	89	89	87	85	83

**Tablica 11. Razine buke vitala (za bočnu užad i podizanje kopača)**

Srednje oktavne frekvencije, Hz								
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Buka koja se širi zrakom, dB								
81	81	82	83	83	84	82	79	77
Buka koja se širi konstrukcijom, dB								
67	68	68	74	75	74	72	71	66

**Tablica 12. Razine buke ventilatora strojarnice**

Srednje oktavne frekvencije, Hz								
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Buka koja se širi zrakom, dB								
99	100	100	99	97	95	91	83	65
Buka koja se širi konstrukcijom, dB								
99	100	100	99	97	95	91	83	65

**Tablica 13. Razine buke vanjske jedinice klimatizacije**

Srednje oktavne frekvencije, Hz								
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Buka koja se širi zrakom, dB								
86	89	92	94	93	91	85	78	78
Buka koja se širi konstrukcijom, dB								
58	58	60	63	65	58	52	40	33

**Tablica 14. Razine buke reduktora vijaka**

Srednje oktavne frekvencije, Hz								
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Buka koja se širi zrakom, dB								
80	82	84	83	82	81	80	79	77
Buka koja se širi konstrukcijom, dB								
75	76	77	79	78	78	76	74	69

## 7. NUMERIČKI MODEL

U korištenom programskom paketu postoje dva glavna načina rada, a to su „Topologija“ te „Buka i vibracije“. Topološki način rada koristi se za izradu, raspoređivanje i organizaciju ploha koje predstavljaju palube, pregrade i oplatu modeliranog broda. U načinu rada „Buka i vibracije“ tim se ploham dodjeljuju pripadajuća svojstva (npr. materijal, debljina) kako bi se vjerodostojnije modelirala konstrukcija broda. U ovom se načinu rada također definiraju izvori buke i vibracija, dodjeljuju svojstva odjeljcima na brodu, odabire tip izolacije te pokreće proračun.

Za izradu modela za proračun buke, potrebni su sljedeći podaci:

- Raspored glavnih konstrukcijskih elemenata i prostora na brodu, uključujući lokacije pregrada koje zatvaraju prostore. Model treba sadržavati odjeljke između izvora buke i odjeljka u kojem se mjeri buka, kao i relevantne okolne odjeljke.
- Konstrukcijski detalji pregrada i paluba, uključujući debljinu lima, razmak okvira, poprečni presjek okvira itd.
- Za cjevovode je potrebno znati duljinu cijevi do prve pregrade, promjer, omotač itd.
- Za sustave grijanja, ventilacije i klimatizacije potreban je raspored zračnih vodova, dimenzije poprečnog presjeka voda, brzine strujanja itd.

Za modeliranje izvora buke i vibracija potrebni su sljedeći podaci:

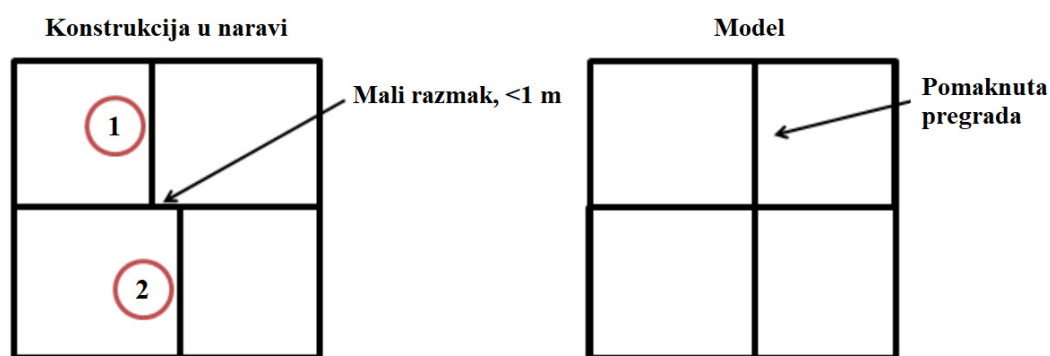
- Za strojeve i uređaje:
  - Uprosječene razine zvučnog tlaka po oktavama, izmjerene blizu izvora (uobičajeno 1 m od izvora),
  - Uprosječene razine vibracija po oktavama, ispod ili iznad temelja,
  - Dimenzije izvora i temelja, te položaj izvora,
  - Način temeljenja (kruto ili elastično).



- Za ventilatore u sustavu grijanja, ventilacije i klimatizacije potrebno je znati razinu zvučne snage po oktavama unutar zračnog voda ili detalje o ventilatoru kao što su tip ventilatora, broj okretaja, broj lopatica itd.
- Za modeliranje brodskog vijka potrebne su njegove dimenzije, brzina broda, brzina pri kojoj započinje kavitacija, broj okretaja, broj lopatica i zračnost.
- Za modeliranje valova kao izvora buke potrebna je valna visina, brzina broda i susretni kut.

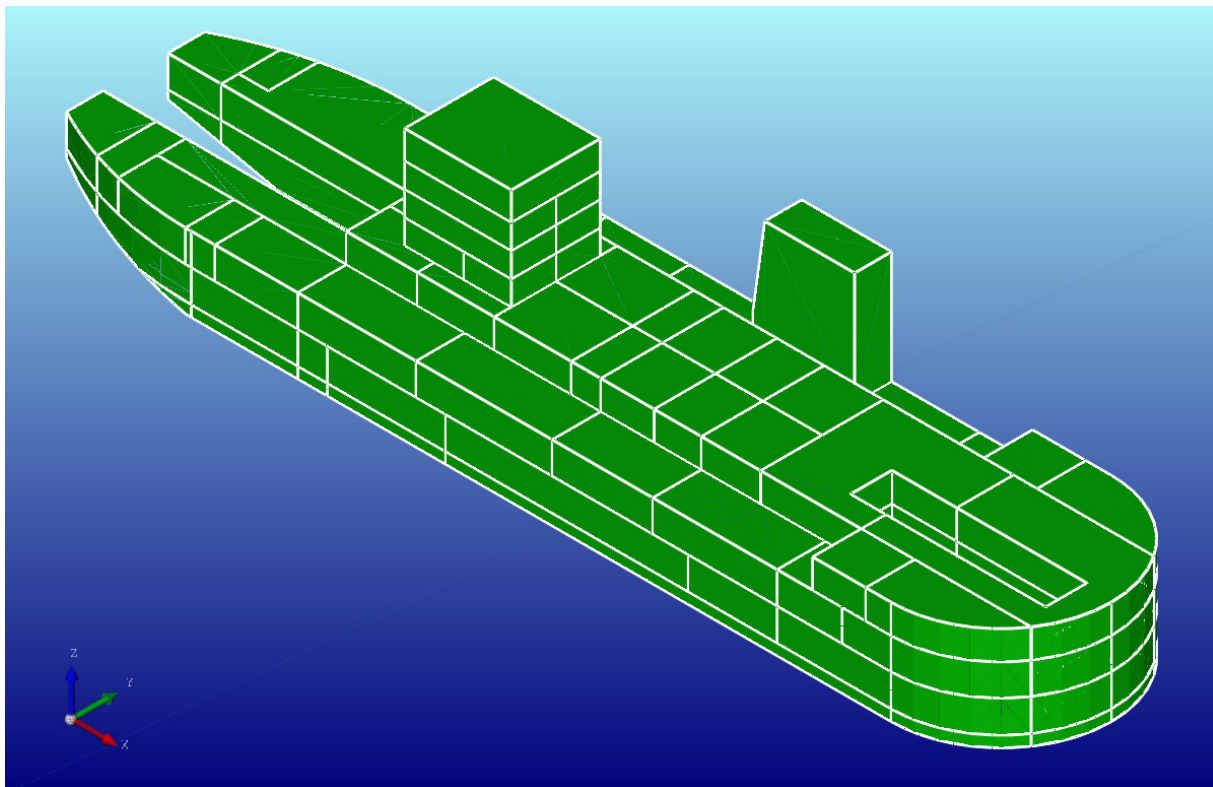
Izrada modela započinje definiranjem geometrije broda, koristeći jednostavna geometrijska tijela. Proces izrade geometrije je iterativan, a sastoji se od kreiranja jednostavnih geometrijskih entiteta (kvadar, cilindar, kugla), njihovim međusobnim spajanjem (koristeći principe Booleove algebre), dodavanjem površina i pročišćavanjem modela.

Važno je napomenuti da prilikom modeliranja treba izbjegavati elemente s velikim omjerom stranica, pri čemu je preporučena minimalna širina, odnosno duljina elementa 1 m. Zato se pri modeliranju konstrukcija pojednostavljuje kao što je prikazano na Slici 23. Iako na prvi pogled model ne odgovara konstrukciji u naravi, primjena većih elemenata omogućava točnije modeliranje toka energije kroz konstrukciju i rezultira preciznijim proračunom [12].



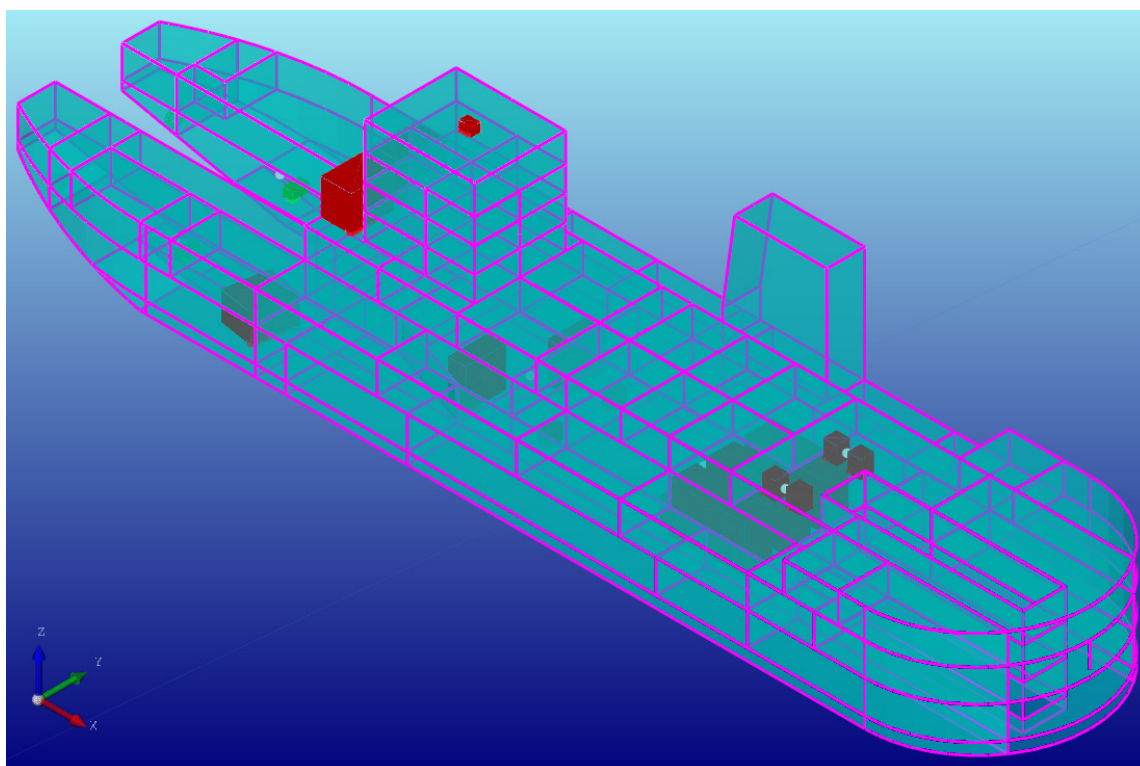
Slika 23. Pojednostavljivanje konstrukcije pri modeliranju [12]

Slika 24 prikazuje topološki model analiziranog broda u *Designer-NOISEu*.

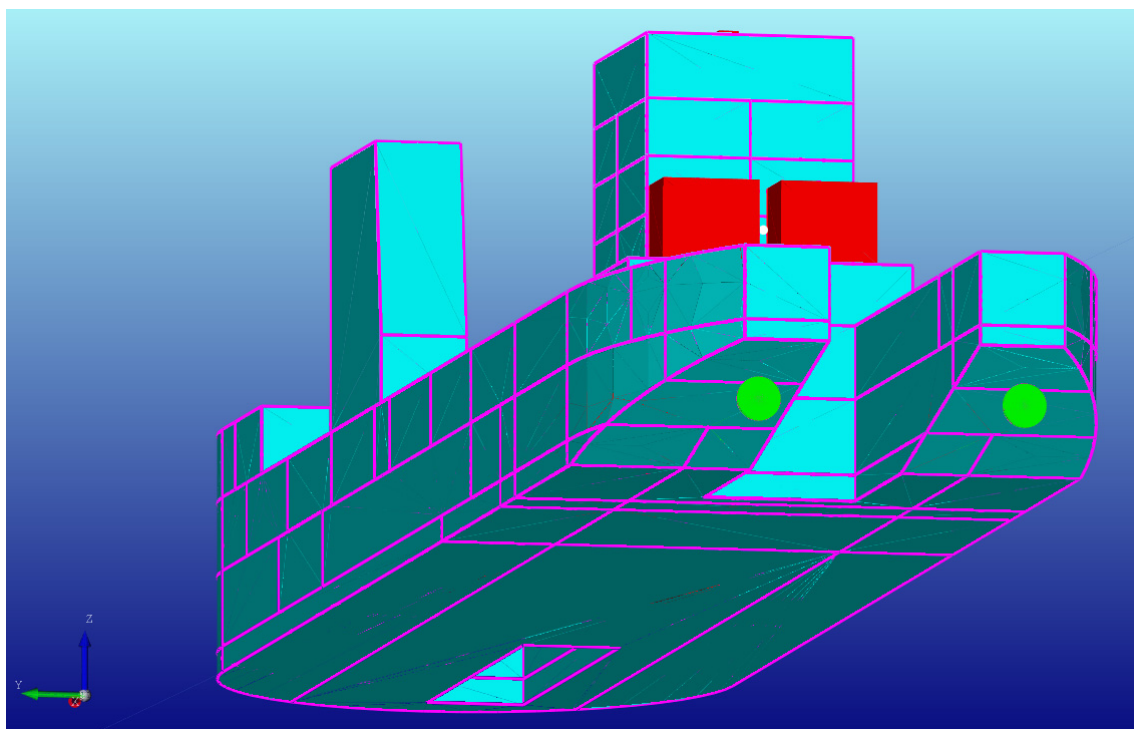


**Slika 24. Topološki model analiziranog broda**

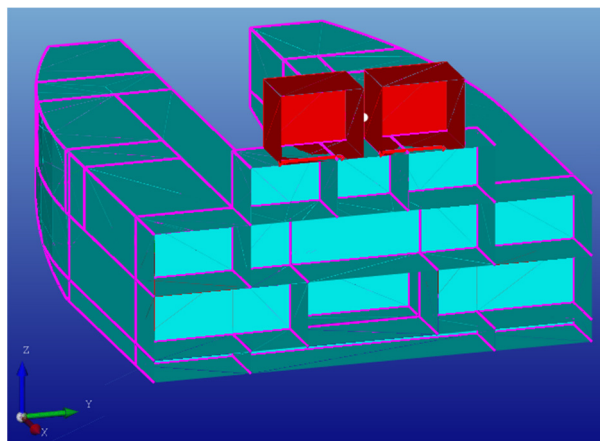
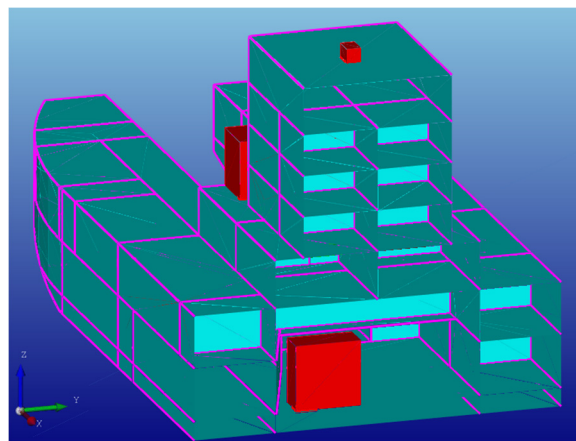
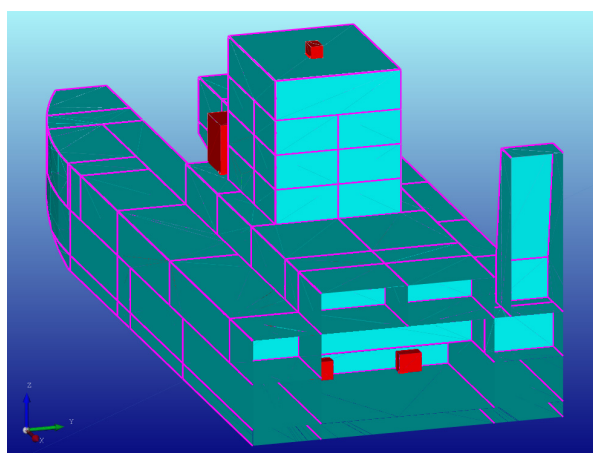
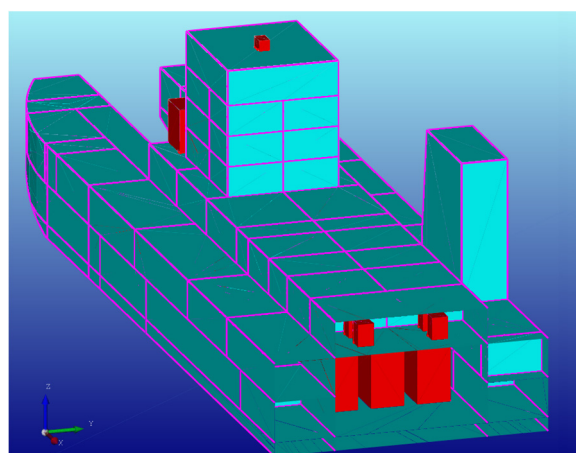
Unošenjem relevantnih podataka vezanih za brodsku konstrukciju kao što su materijal, debljina opločenja, dimenzije karakterističnog panela i sl., direktno iz topološkog modela generira se proračunski model. Proračunski model sastoji se od 486 elemenata što je u skladu s preporučenim brojem elemenata (<500) prema [12], a sadrži 91 odjeljak i 23 izvora buke. Proračunski model prikazan je na Slikama 25, 26 i 27.



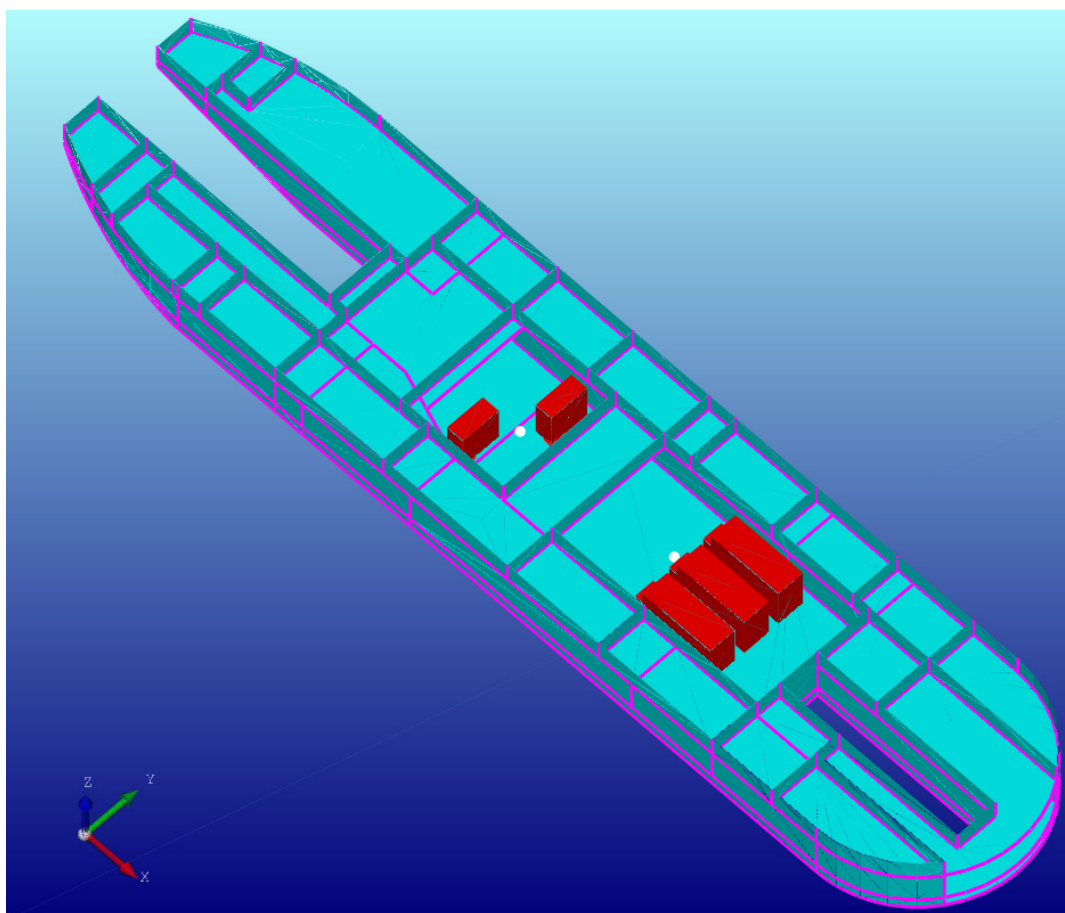
**Slika 25. Proračunski model – aksonometrijski prikaz**



**Slika 26. Proračunski model – pogled s krme**

a)  $x = 30,8$  mb)  $x = 44,8$  mc)  $x = 63,7$  md)  $x = 84,0$  m**Slika 27. Poprečni presjeci proračunskog modela**

Izvori buke modelirani su na temelju specifikacija proizvođača koje su navedene u prethodnom poglavlju i tehničke dokumentacije broda koju je za potrebe ovog rada ustupilo brodogradilište Uljanik. Donja paluba te položaj glavnih motora i pumpi za jaružanje prikazani su na Slici 28.



**Slika 28. Donja paluba**

## 8. REZULTATI

Analiza modela rezultira razinama zvučnog tlaka u dB(A) po oktavama za sve odjeljke od interesa. Za svaki odjeljak moguće je prikazati razinu zvučnog tlaka uslijed rada pojedinih izvora. Radi preglednosti, u ovom su poglavlju prikazani rezultati proračuna za dva odjeljka, i to: jednu od kabina za posadu u krmenom dijelu nadgrađa te brodski bar koji se nalazi iznad strojarnice.

U nastavku su za dva navedena odjeljka prikazani njihovi položaji na brodu i dijagrami koji prikazuju razine zvučnog tlaka te dominantan izvor buke za brod bez izolacije i s njom, u oba eksploatacijska režima (plovidba i jaružanje). Utjecaji pojedinih izvora buke prikazani su tablično, također za slučajeve bez izolacije i s izolacijom, u oba eksploatacijska režima.

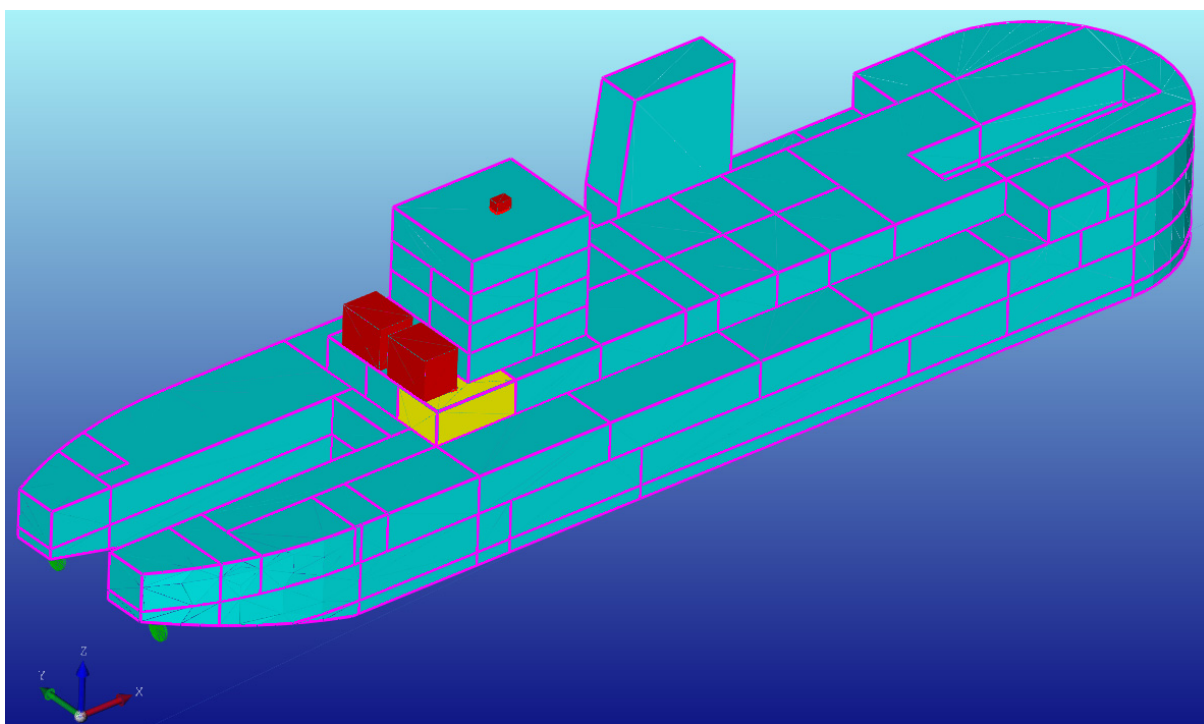
Za izolaciju broda primjenjeni su materijali iz baze podataka korištenog programskog paketa koji su opisani u petom poglavlju. S obzirom da se u strojarnici nalazi najviše strojeva među kojima su i glavni motori, za njezinu izolaciju upotrebljene su sve dostupne metode, i to: HTL (eng. *High Transmission Loss*) izolacijske ploče debljine 25 mm i 100 mm zračnosti, *MIL-PRF-23653C Class 2* prigušne ploče dvostruke debljine elementa te apsorpcijski materijal *DOD-I-24688 Type I* debljine 50 mm. Jednake mjere zaštite od buke primijenjene su u prostoru s ventilatorima strojarnice. Prostorija u kojoj se nalaze pumpe za jaružanje i prostorija u kojoj se nalazi reduktor desnog vijka te desno vitlo za podizanje kopača izolirane su samo s apsorpcijskim materijalom *DOD-I-24688 Type I* debljine 50 mm. Navedeni apsorpcijski materijal primijenjen je u stropovima na palubama A, B i C te u stropu kormilarnice. Stropovi prostorija na glavnim palubama nisu izolirani, izuzev prostorija koje se nalaze ispod vitala za bočnu užad.

### 8.1. Rezultati proračuna za kabinu za posadu u krmenom dijelu nadgrađa

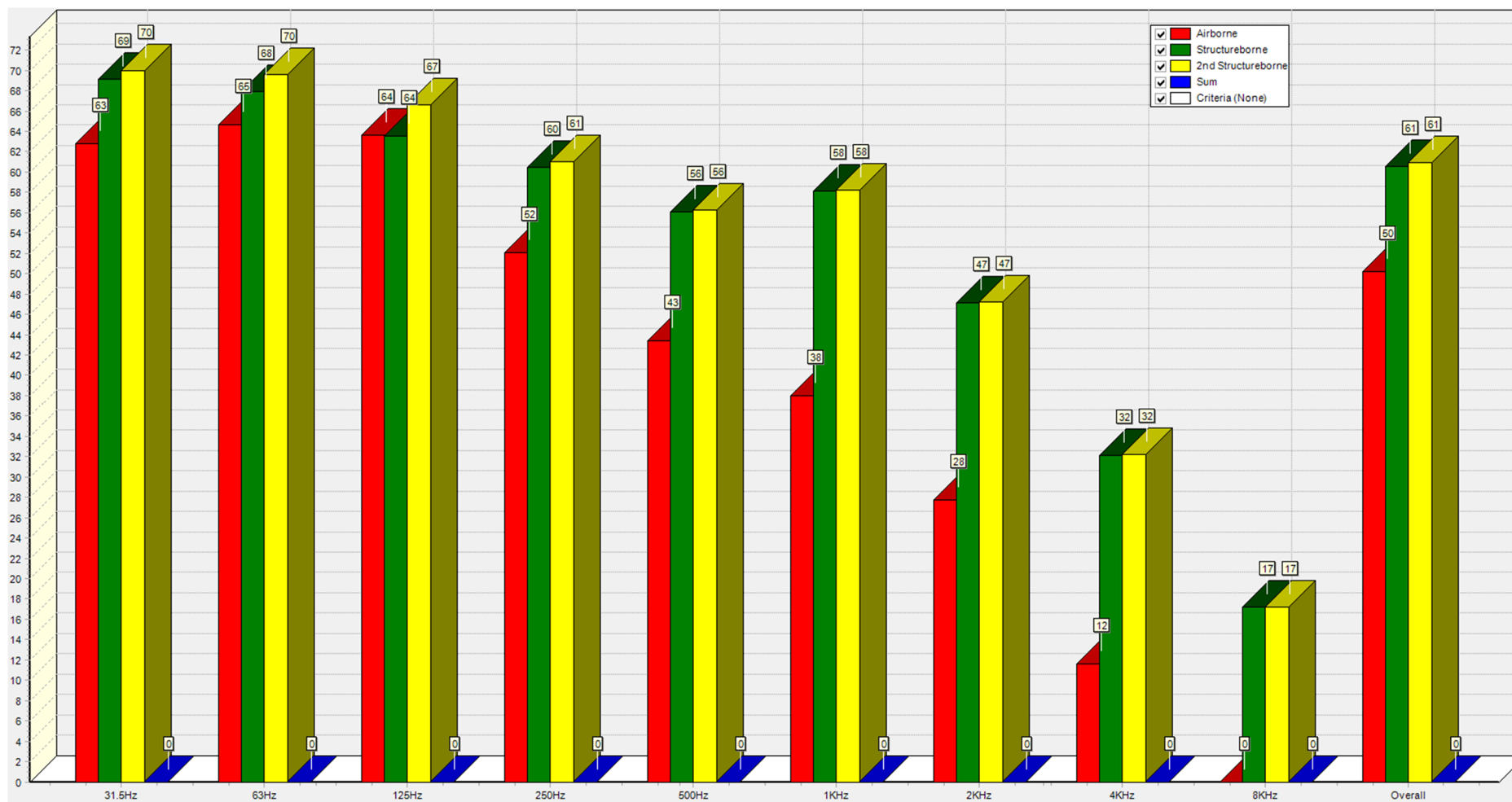
S obzirom na položaj kabine za posadu u krmenom dijelu nadgrađa, Slika 29, odnosno činjenicu da je na njoj postavljeno vitlo za bočnu užad, bilo je za očekivati da će ovdje biti nužna primjena izolacijskih materijala. To su pokazali i proračuni buke za brod bez zvučne izolacije u stanju plovidbe i jaružanja. Iako su bez primjene izolacije u stanju plovidbe razine buke na prihvatljivoj razini, Slika 30, isto se ne može reći za brod u režimu jaružanja pri čemu



razina buke dostiže nedopuštenu razinu od 67 dB(A), Slika 31. Upotrebom apsorpcijskog materijala *DOD-I-24688 Type I* debljine 50 mm u stropu kabine, razina buke smanjena je na 46 dB(A) za vrijeme plovidbe, Slika 32, odnosno 59 dB(A) za vrijeme jaružanja, Slika 33, pri čemu je dozvoljena vrijednost 60 dB(A). Tablica 15 prikazuje doprinos ukupnoj razini buke uslijed rada pojedinih izvora buke, za brod bez izolacije i s njom, u oba eksploatacijska režima. Očekivano, dominantan izvor buke u režimu jaružanja za ovu prostoriju je desno vitlo za bočnu užad, Slika 34.

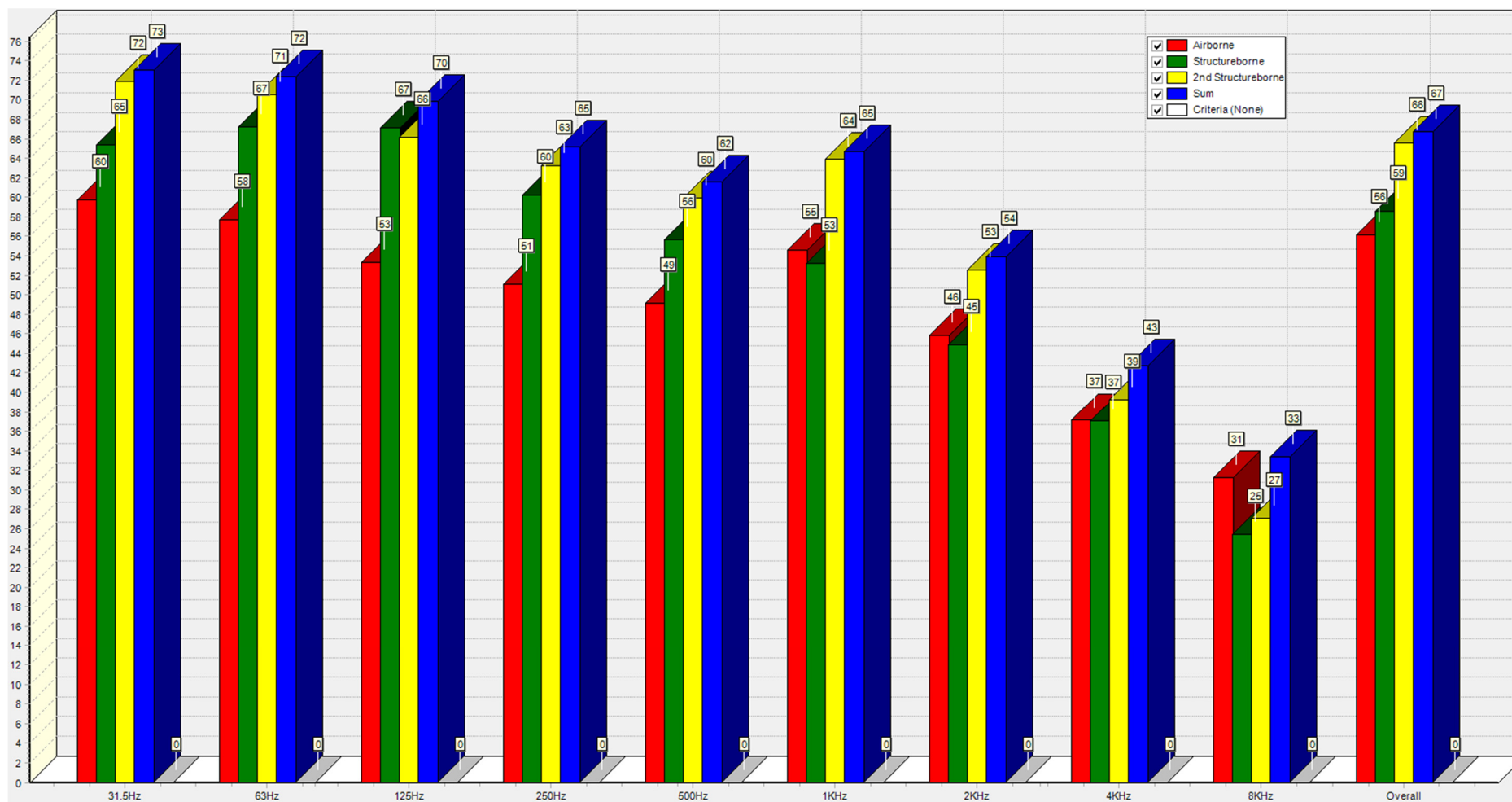


**Slika 29. Položaj kabine za posadu u krmenom dijelu nadgrađa (označeno žuto)**

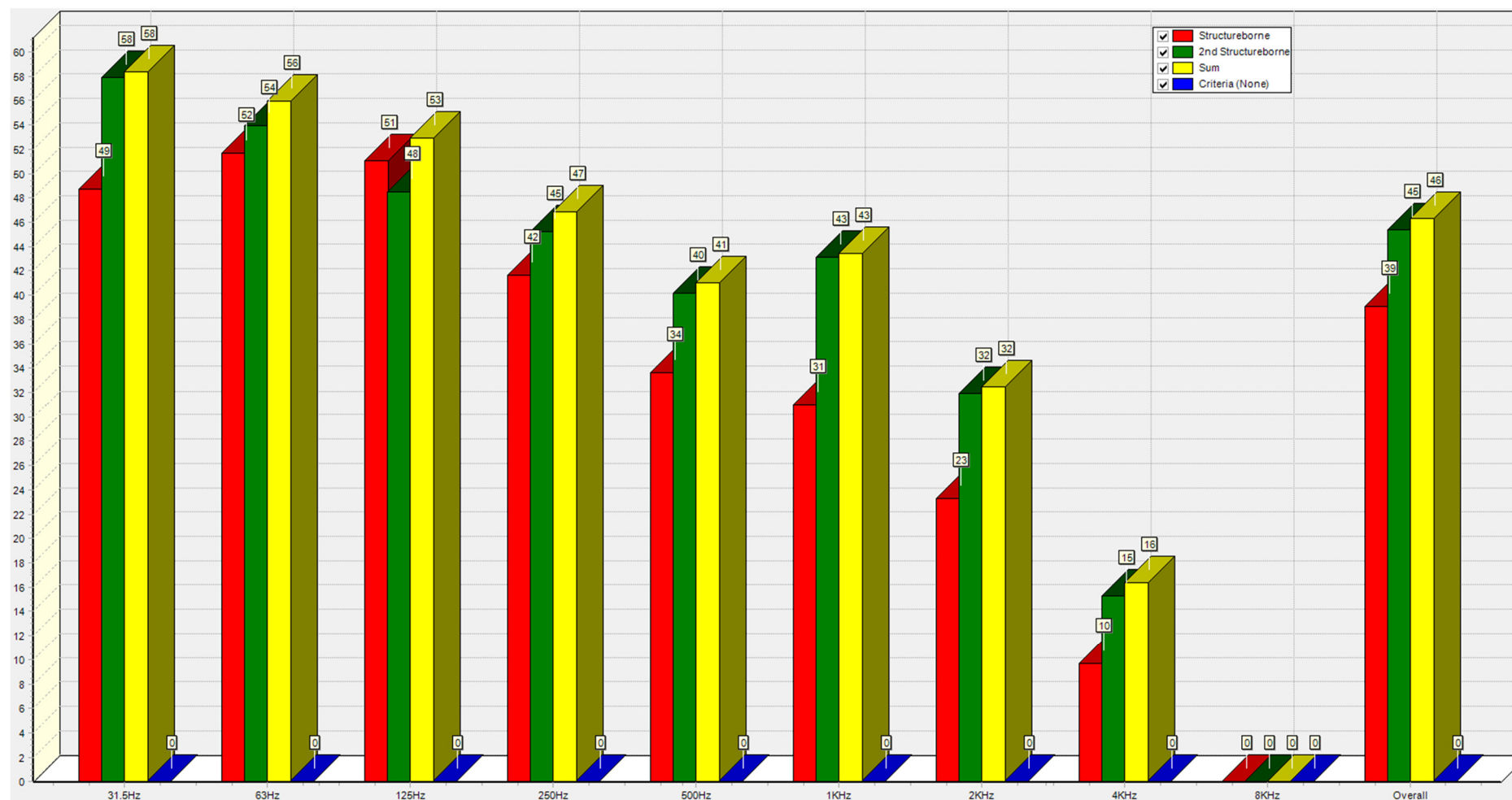


Slika 30. Razine zvučnog tlaka u kabini posade, brod bez izolacije za vrijeme plovidbe

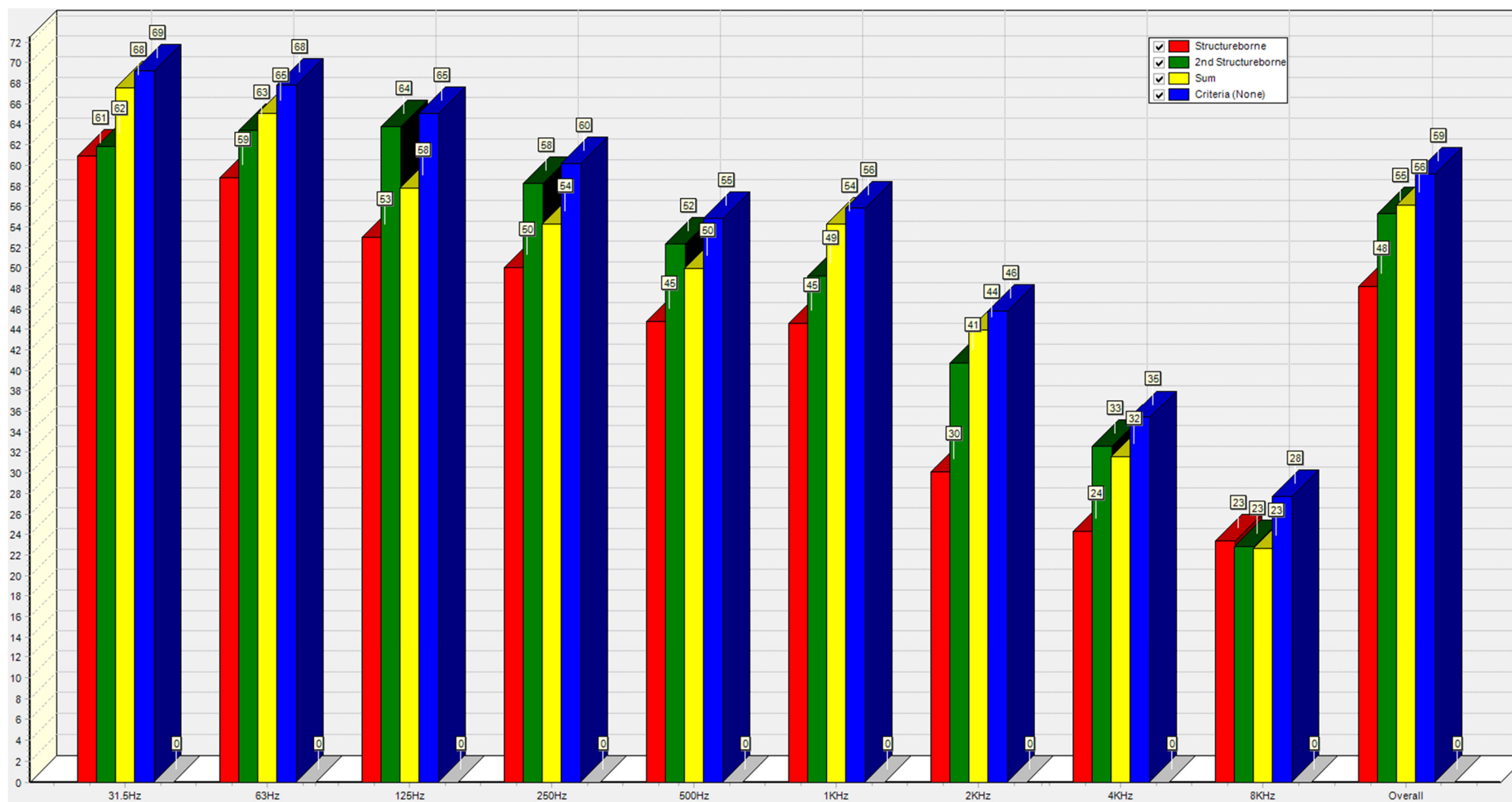




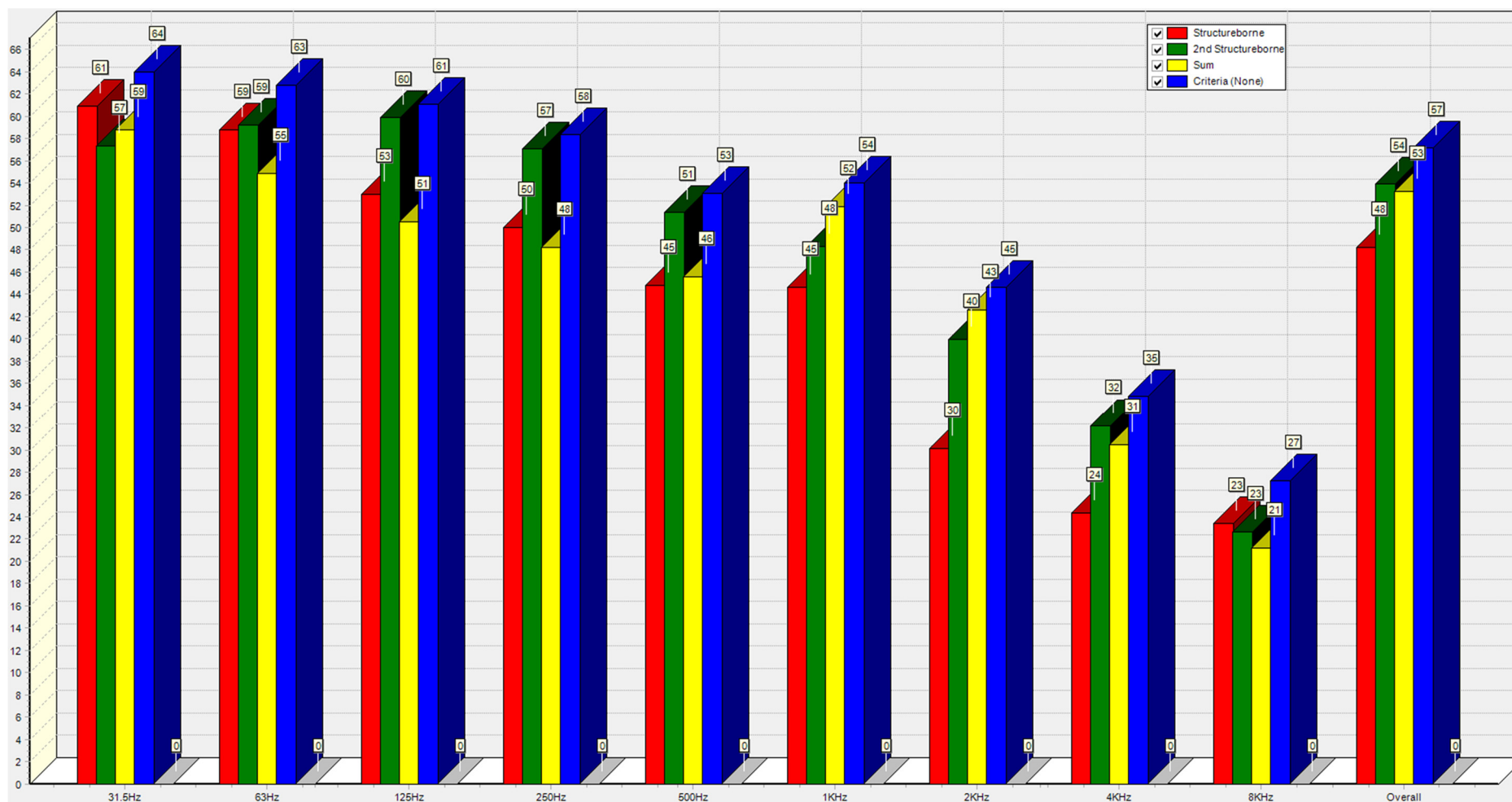
Slika 31. Razine zvučnog tlaka u kabini posade, brod bez izolacije za vrijeme jaružanja



Slika 32. Razine zvučnog tlaka u kabini posade, brod s izolacijom za vrijeme plovidbe



Slika 33. Razine zvučnog tlaka u kabini posade, brod s izolacijom za vrijeme jaružanja



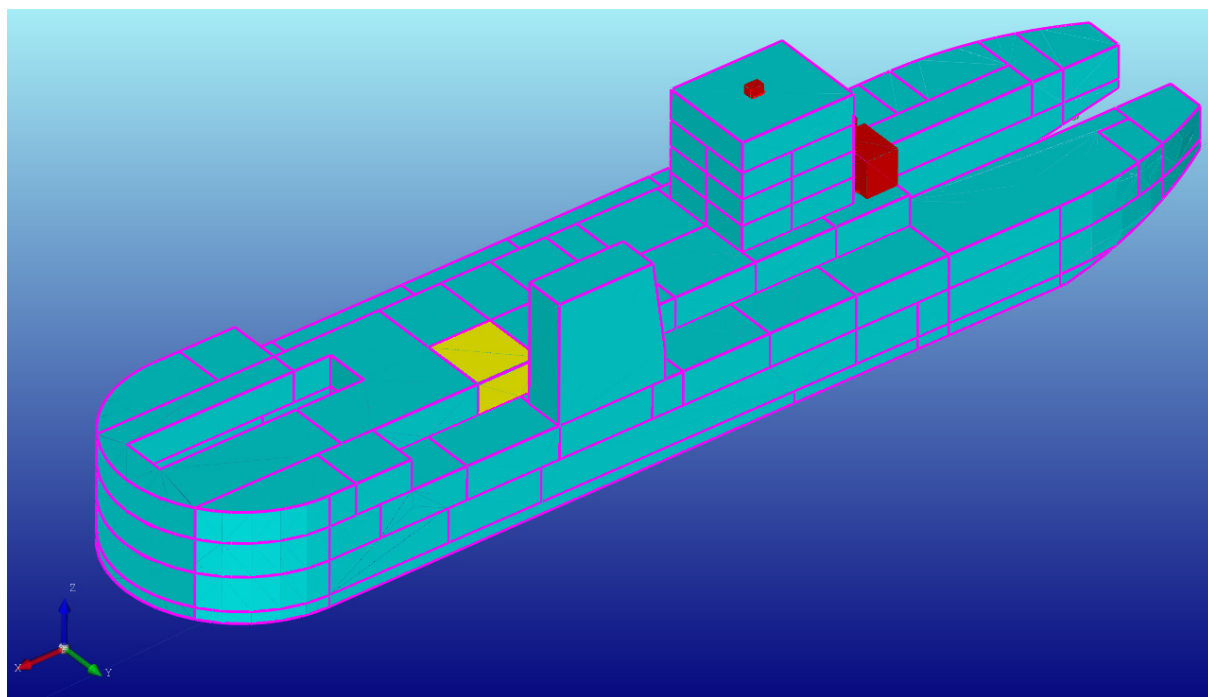
Slika 34. Razine zvučnog tlaka u kabini posade uslijed rada desnog vitla za bočnu užad

**Tablica 15. Doprinos pojedinih izvora ukupnoj razini zvučnog tlaka u kabini za posadu**

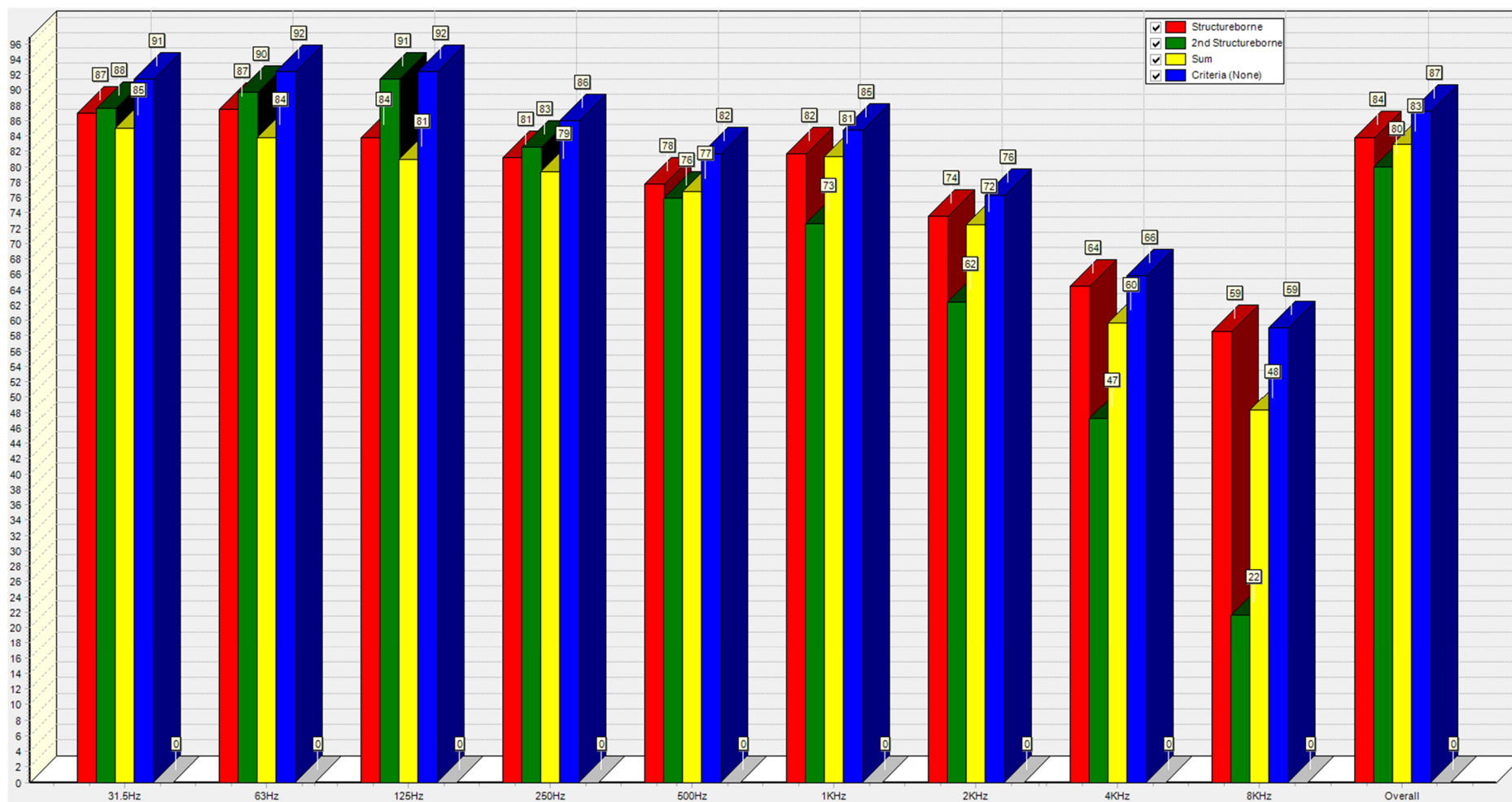
Izvor	Predviđena razina zvučnog tlaka, dB(A)			
	Bez izolacije (plovidba)	Bez izolacije (jaružanje)	S izolacijom (plovidba)	S izolacijom (jaružanje)
Glavni motor 1	/	57	/	44
Glavni motor 2	57	57	40	40
Glavni motor 3	57	57	40	40
Reduktor glavnog motora 1	/	47	/	36
Reduktor glavnog motora 2	47	47	34	34
Reduktor glavnog motora 3	47	47	34	34
Pumpa za jaružanje 2	/	59	/	50
Pumpa za jaružanje 3	/	58	/	47
Reduktor pumpe za jaružanje 2	/	43	/	33
Reduktor pumpe za jaružanje 3	/	43	/	34
Desno vitlo za bočnu užad	/	61	/	57
Lijevo vitlo za bočnu užad	/	51	/	48
Desno vitlo za podizanje kopača	/	46	/	36
Lijevo vitlo za podizanje kopača	/	39	/	36
Ventilator strojarnice 1	44	44	23	23
Ventilator strojarnice 2	42	42	23	23
Ventilator strojarnice 3	45	45	26	26
Ventilator strojarnice 4	43	43	27	27
Vanjska jedinica klimatizacije	46	46	39	39
Desni vijak	31	/	29	/
Lijevi vijak	27	/	24	/
Reduktor desnog vijka	41	/	34	/
Reduktor lijevog vijka	35	/	33	/
Ukupna razina buke:	<b>61</b>	<b>67</b>	<b>46</b>	<b>59</b>

## 8.2. Rezultati proračuna za brodski bar

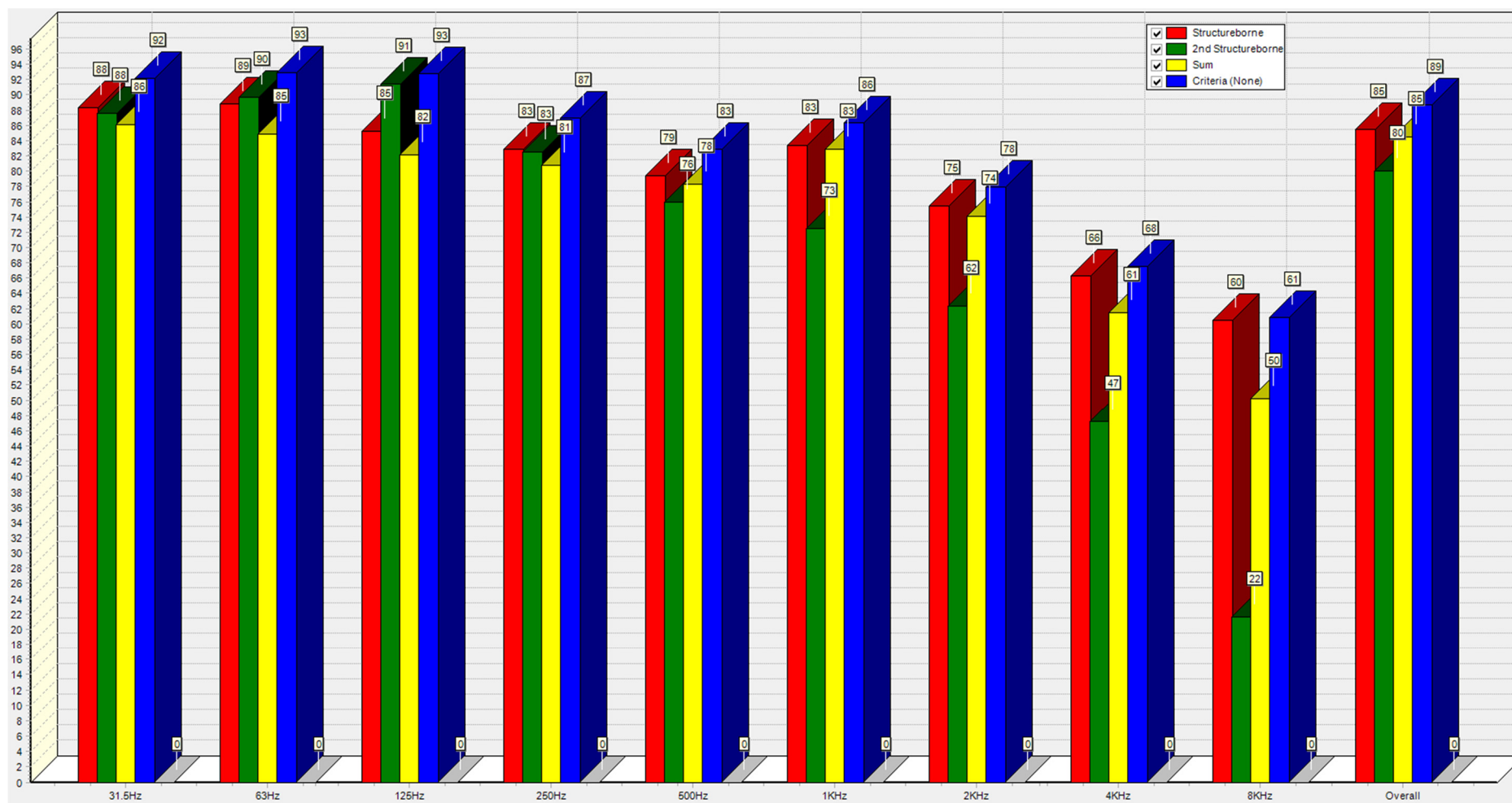
Brodski bar nalazi se u pramčanom dijelu nadgrađa, a smješten je iznad strojarnice i u neposrednoj blizini ventilatora strojarnice, Slika 35. Rezultati proračuna buke u plovidbi, Slika 36, te u režimu jaružanja, Slika 37, prikazuju očekivano visoke razine buke s obzirom da su glavni motori, pripadajući reduktori i ventilatori strojarnice aktivni u oba eksploatacijska režima. Unatoč tome, primjenom svih dostupnih metoda sanacije buke u strojarnici i prostoriji s ventilatorima strojarnice, razine buke svedene su na prihvatljive razine. Za brod s izolacijom tijekom plovidbe, razina buke u brodskom baru iznosi 64 dB(A), Slika 38, a za vrijeme jaružanja 65 dB(A), Slika 39. Doprinosi pojedinih izvora ukupnoj razini buke za brod bez izolacije i s njom, u oba eksploatacijska režima prikazani su u Tablici 16. Očekivano, dominantni izvori buke su glavni motori, pri čemu se ističe drugi glavni motor koji se nalazi na lijevoj strani broda, neposredno ispod broorskog bara, Slika 40.



Slika 35. Položaj broorskog bara (označeno žuto)

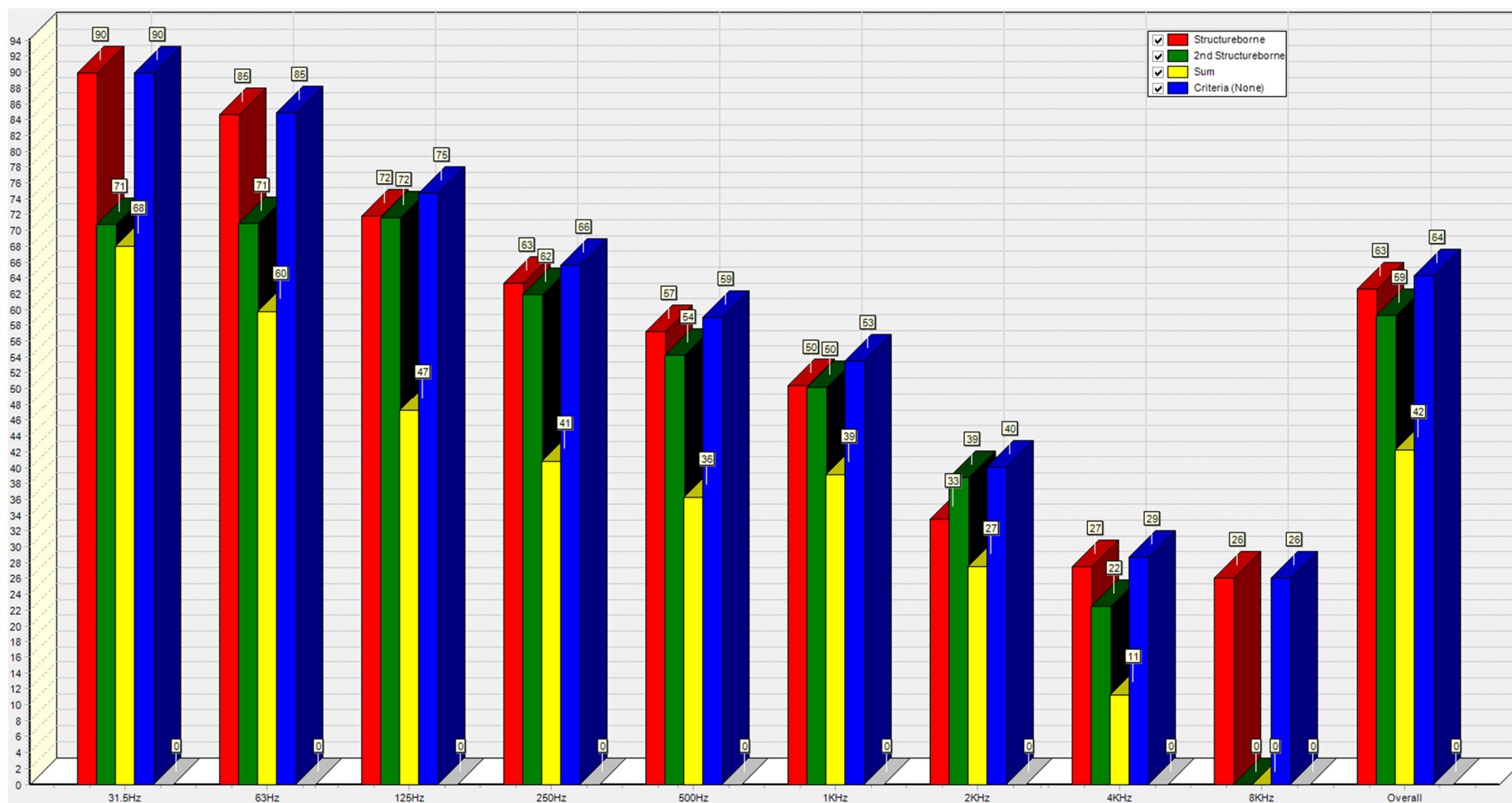


Slika 36. Razine zvučnog tlaka u brodskom baru, brod bez izolacije za vrijeme plovidbe

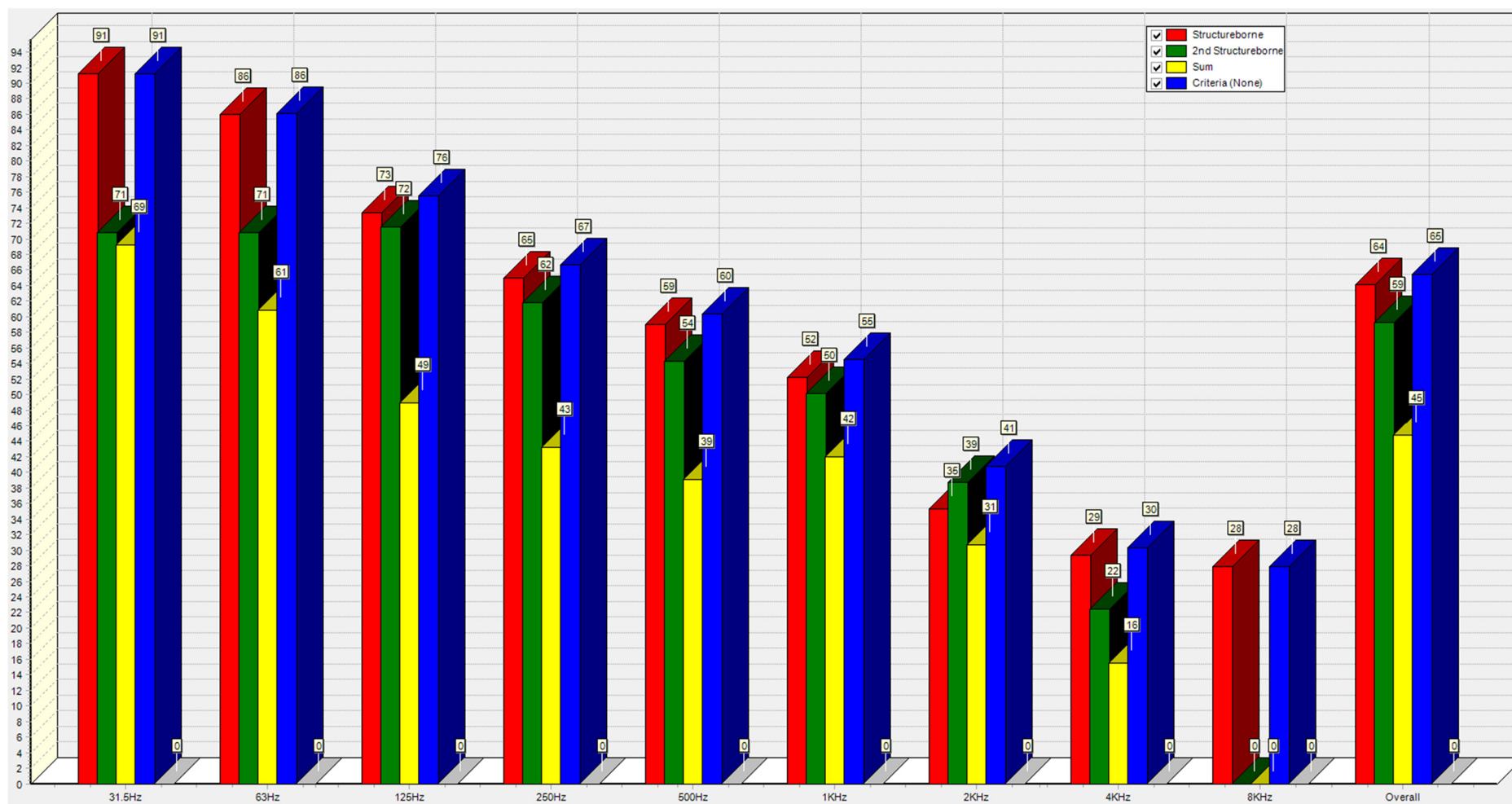


Slika 37. Razine zvučnog tlaka u brodskom baru, brod bez izolacije za vrijeme jaružanja

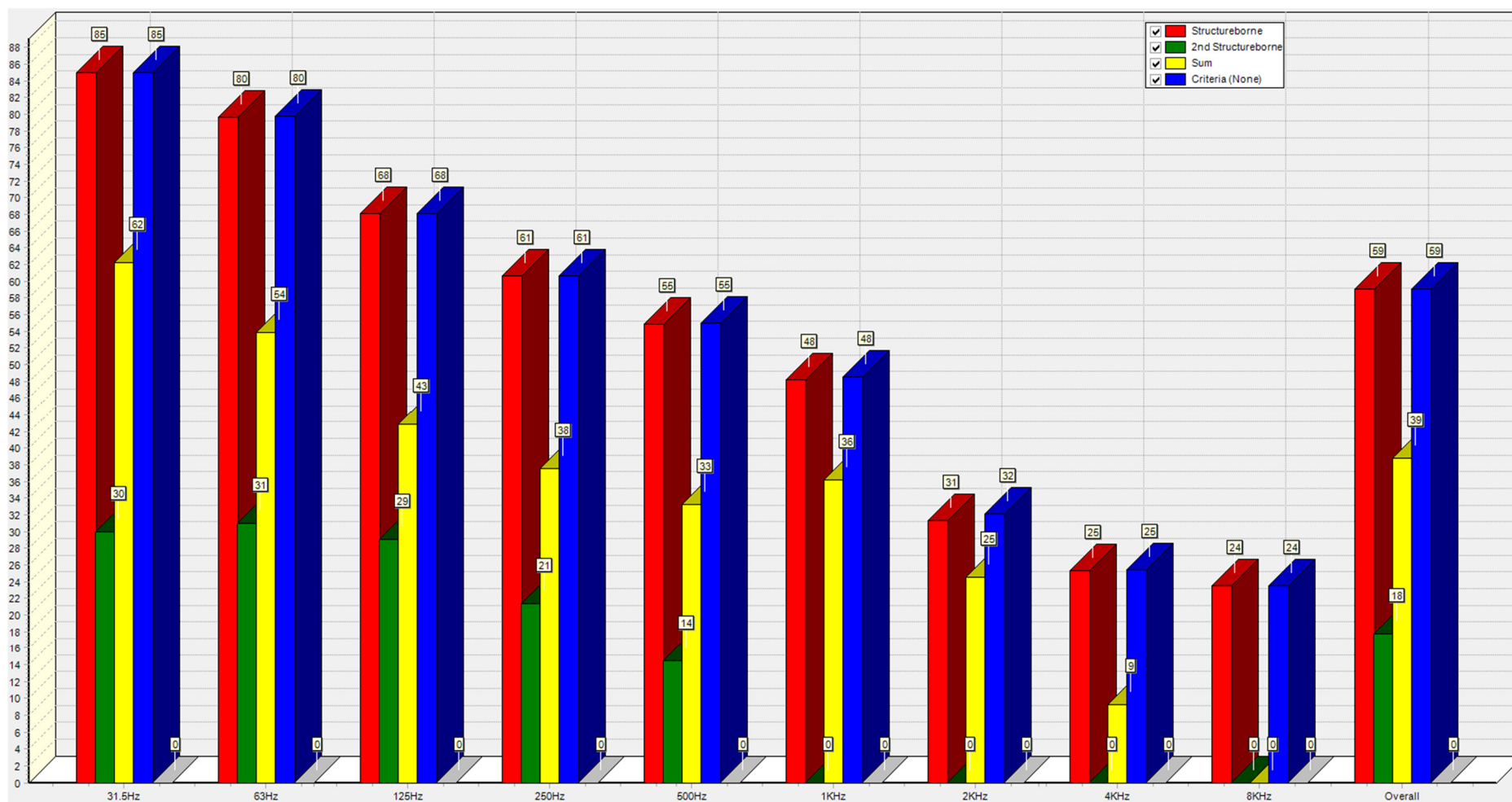




Slika 38. Razine zvučnog tlaka u brodskom baru, brod s izolacijom za vrijeme plovidbe



Slika 39. Razine zvučnog tlaka u brodskom baru, brod s izolacijom za vrijeme jaružanja



Slika 40. Razine zvučnog tlaka u brodskom baru uslijed rada drugog glavnog motora

**Tablica 16. Doprinos pojedinih izvora ukupnoj razini zvučnog tlaka u brodskom baru**

Izvor	Predviđena razina zvučnog tlaka, dB(A)			
	Bez izolacije (plovidba)	Bez izolacije (jaružanje)	S izolacijom (plovidba)	S izolacijom (jaružanje)
Glavni motor 1	/	83	/	58
Glavni motor 2	83	83	59	59
Glavni motor 3	82	72	57	57
Reduktor glavnog motora 1	/	70	/	48
Reduktor glavnog motora 2	70	70	48	48
Reduktor glavnog motora 3	70	70	48	48
Pumpa za jaružanje 2	/	47	/	28
Pumpa za jaružanje 3	/	48	/	28
Reduktor pumpe za jaružanje 2	/	63	/	37
Reduktor pumpe za jaružanje 3	/	63	/	37
Desno vitlo za bočnu užad	/	22	/	14
Lijevo vitlo za bočnu užad	/	22	/	15
Desno vitlo za podizanje kopača	/	17	/	7
Lijevo vitlo za podizanje kopača	/	16	/	7
Ventilator strojarnice 1	78	78	58	58
Ventilator strojarnice 2	75	75	54	54
Ventilator strojarnice 3	75	75	53	53
Ventilator strojarnice 4	74	74	52	52
Vanjska jedinica klimatizacije	21	21	9	9
Desni vijak	0	/	/	/
Lijevi vijak	0	/	/	/
Reduktor desnog vijka	13	/	7	/
Reduktor lijevog vijka	13	/	7	/
<b>Ukupna razina buke:</b>	<b>87</b>	<b>89</b>	<b>64</b>	<b>65</b>

Naposljetku, rezultati proračuna za sve ostale odjeljke za koje je proveden proračun prikazani su u Tablici 17, s pripadajućim položajima na brodu i propisanim razinama buke, a položaji i dijagrami za njih nekoliko dani su u Prilogu II.

### 8.3. Skupni rezultati za sve brodske prostore od interesa

**Tablica 17. Predviđene razine zvučnog tlaka za sve odjeljke od interesa**

			Jaruzanje		Plovidba		Ograničenje
Broj	Rebra	Naziv	Bez izo.	S izo.	Bez izo.	S izo.	
DONJA PALUBA							
1	59-82	Upravljačka soba strojarnice	83	65	81	61	75
2	100-120	Strojarska radionica	87	69	86	67	85
3	54-68	Električarska radionica	76	67	73	61	85
4	2-7	Kabina, jedan član posade	59	50	58	55	60
5	11-15	Kabina, dva člana posade	60	51	57	50	60
6	30-34	Kabina, dva člana posade	64	56	59	50	60
GLAVNA PALUBA							
7	44-48	Kabina, jedan član posade	67	59	61	46	60
8	57-60	Kabina, jedan član posade	72	60	67	49	60
9	68-73	Kabina, jedan član posade	76	58	73	49	60
10	77-82	Bolnica	82	55	80	49	65
11	81-91	Kantina 2	86	62	85	60	65
12	91-99	Kuhinja	88	64	86	62	75
13	99-109	Kantina 1	89	66	87	64	65
14	99-109	Brodski bar	89	65	87	64	65
15	91-99	Teretana	88	63	86	62	65
PALUBA S DIZALICOM							
16	46-50	Kabina, jedan član posade	66	57	62	48	60
17	57-64	Kabina, jedan član posade	67	54	64	48	60
C-PALUBA							
18	46-50	Kabina, jedan član posade	62	54	60	52	60
19	57-64	Kabina, jedan član posade	63	54	61	52	60
B-PALUBA							
20	46-58	Ured	65	57	65	57	65
21	57-64	Kapetanova dnevna soba	64	57	64	57	60
22	56-64	Dnevna soba gl. inženjera	64	57	64	57	60
A-PALUBA							
23	43-64	Kormilarnica	72	62	72	61	65

## 9. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu, metoda hibridne statističke analize energije primijenjena je za prognozu buke na jaružalu na vlastiti pogon, za vrijeme dva tipična eksploatacijska režima (plovidba i jaružanje). Analizirano jaružalo izgrađeno je u brodogradilištu Uljanik, koje je ustupilo odgovarajuću tehničku dokumentaciju i podatke o izvorima buke, na temelju kojih je generiran odgovarajući numerički model u komercijalnom programskom paketu *Designer-NOISE*.

S obzirom da se mjerenje buke u naravi provodi nakon završetka gradnje broda, sanacija prekomjernih razina predstavlja veliki trošak za brodogradilište i brodovlasnika. Upravo zato je uspješno predviđanje eventualnih akustičkih problema na brodu od velike važnosti. Korišteni programski paket omogućuje brzo i pouzdano identificiranje prostora na brodu u kojima može doći do akustičkih problema, te omogućava brz pronalazak optimalnog rješenja u obliku zvučne izolacije.

Dobiveni rezultati ukazuju da je primjenom adekvatne izolacije u ključnim prostorima na brodu razina buke u svim važnim prostorima svedena na prihvatljivu razinu.

Iako su dozvoljene razine buke propisane *IMO Noise Codeom* na razini preporuke, a akustički proračuni nisu standardni dio klasifikacijske dokumentacije, za očekivati je da će se ovakvi proračuni buke provoditi sve češće i za sve tipove brodova. Razlog tomu su nova saznanja o negativnim utjecajima buke na zdravlje čovjeka, ugradnja sve većeg broja strojeva i uređaja velikih snaga, uvođenje klasa udobnosti, i nastojanje da se izbjegnu nepotrebni troškovi pravovremenim detektiranjem potencijalnih akustičkih problema.

Na temelju analizirane literature u okviru ovog diplomskog rada, za očekivati je da će se daljnja istraživanja u brodskoj akustici kretati u dva smjera. Prvi je vezan za razvoj numeričkih metoda za analizu buke. Naime, modeli generirani metodom konačnih elemenata imaju ogroman značaj u brodograđevnoj praksi i od velike važnosti bi bila mogućnost njihova direktnog korištenja i za proračune buke. Za tu svrhu potrebna su dodatna poboljšanja metode energetskih konačnih elemenata, imajući u vidu potrebu za velikim računalnim resursima. Drugi smjer vezan je za regulativu u području buke na brodovima, pri čemu je potrebno

utvrditi praktičan značaj uvođenja novih kriterija na putnike i posadu na brodovima, kao i investicijske troškove dodatnih ulaganja u poboljšanje akustičkih svojstava, osobito u smislu udovoljavanja brodova tzv. klasama udobnosti. Isto tako, važno je istaknuti da jaružala nisu obuhvaćena *IMO Noise Codeom*, iako je problem buke (zbog velike instalirane snage) na njima prilično izražen. Neovisno o tome, u brodograđevnoj praksi je za plovila ovog tipa uobičajeno da se dopuštene razine buke definiraju ugovorom o gradnji broda između brodovlasnika i brodogradilišta.

## LITERATURA

- [1] KURT, R.E., MCKENNA, S.A., GUNBEYAZ, S.A., TURAN, O.: „*Investigation of occupational noise exposure in a ship recycling yard*“, Ocean Engineering, Vol. 137, 2017, pp. 440-449.
- [2] BORELLI, D., GAGGERO, T., RIZZUTO, E., SCHENONE, C.: „*Analysis of noise on board a ship during navigation and manoeuvres*“, Ocean Engineering, Vol. 105, 2015, pp. 256-269.
- [3] BADINO, A., BORELLI, D., GAGGERO, T., RIZZUTO, E., SCHENONE, C.: „*Airborne noise emissions from ships: Experimental characterization of the source and propagation over land*“, Applied Acoustics, Vol. 104, 2016, pp. 158-171.
- [4] KURT, R.E., KHALID, H., TURAN, O., HOUBEN, M., BOS, J., HELVACIOUGLU, I.H.: „*Towards human-oriented norms: Considering the effects of noise exposure on board ships*“, Ocean Engineering, Vol. 120, 2016, pp. 101-107.
- [5] Leksikografski zavod Miroslav Krleža, <<http://www.enciklopedija.hr/>>, (Pristupljeno 13. lipnja 2018.).
- [6] <https://static.rockwool.com/globalassets/rockwool-hr/downloads/broure-i-katalozi/acoustic-brosura-izolacijske-ploce-brosura-rockwool.hr.pdf>, (Pristupljeno 29. lipnja 2018.).
- [7] ISO 226:2003, „Acoustics – Normal equal-loudness-level contours“.
- [8] IEC 61672-1:2013, „Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications“.
- [9] IEC 60651:1979, „Sound level meters“.
- [10] IMO Resolution MSC.337(91): 2014, „Code on noise levels on board ships“.
- [11] TUDOR, H.: „*Techno-economic assessment of new marine engine development with high noise and vibration performance*“, M.Sc. Thesis, University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2017.
- [12] [http://noise-control.com/Designer\\_Noise\\_Help/](http://noise-control.com/Designer_Noise_Help/), (Pristupljeno 22. lipnja 2018.).
- [13] IEC 61260-1:2014, „Electroacoustics – Octave-and fractional-octave-band filters – Part 1: Specifications“.



- [14] <https://www.ht-instruments.co.uk/en-gb/products/environmental-measurements/sound-level-meters/ht157/>, (Pristupljeno 19. lipnja 2018.).
- [15] ISO 1999:2013, „Acoustics – Estimation of noise-induced hearing loss“.
- [16] PASSCHIER-VERMEER, W., PASSCHIER, W., „Noise Exposure and Public Health“, Environmental Health Perspectives, Vol. 108, Supplement 1: Reviews in Environmental Health, 2000, pp. 123-131.
- [17] <https://www.paroc.com/knowhow/sound/general-information-about-sound>, (Pristupljeno 17. lipnja 2018.).
- [18] ISO 717-1:2013, „Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation“.
- [19] ISO 354:2003, „Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room“.
- [20] ISO 11654:1997, „Acoustics – Sound absorbers for use in buildings – Rating of sound absorption“.
- [21] <https://www.paroc.com/knowhow/sound/sound-classification>, (Pristupljeno 17. lipnja 2018.).
- [22] IMO Resolution A.343(IX): 1975, „Recommendation on methods of measuring noise levels at listening posts“.
- [23] IMO Resolution A.468(XII): 1981, „Code on noise levels on board ships“.
- [24] ISO 2923:1996-12, „Acoustics – Measurement of noise on board vessels“.
- [25] ISO 80000-8:2007, „Quantities and units – Part 8: Acoustics“.
- [26] IEC 61672-2:2013+AMD1:2017 CSV, „Electroacoustics – Sound level meters – Part 2: Pattern evaluation tests“.
- [27] IEC 61672-3:2013, „Electroacoustics – Sound level meters – Part 3: Periodic tests“.
- [28] IEC 61260-2:2016+AMD1:2017 CSV, „Electroacoustics – Octave-and fractional-octave-band filters – Part 2: Pattern evaluation tests“.
- [29] IEC 61260-3:2016, „Electroacoustics – Octave-and fractional-octave-band filters – Part 3: Periodic tests“.
- [30] ISO 20283-3:2006, „Mechanical vibration – Measurement of vibration on ships – Part 3: Pre-installation vibration measurement of shipboard equipment“.

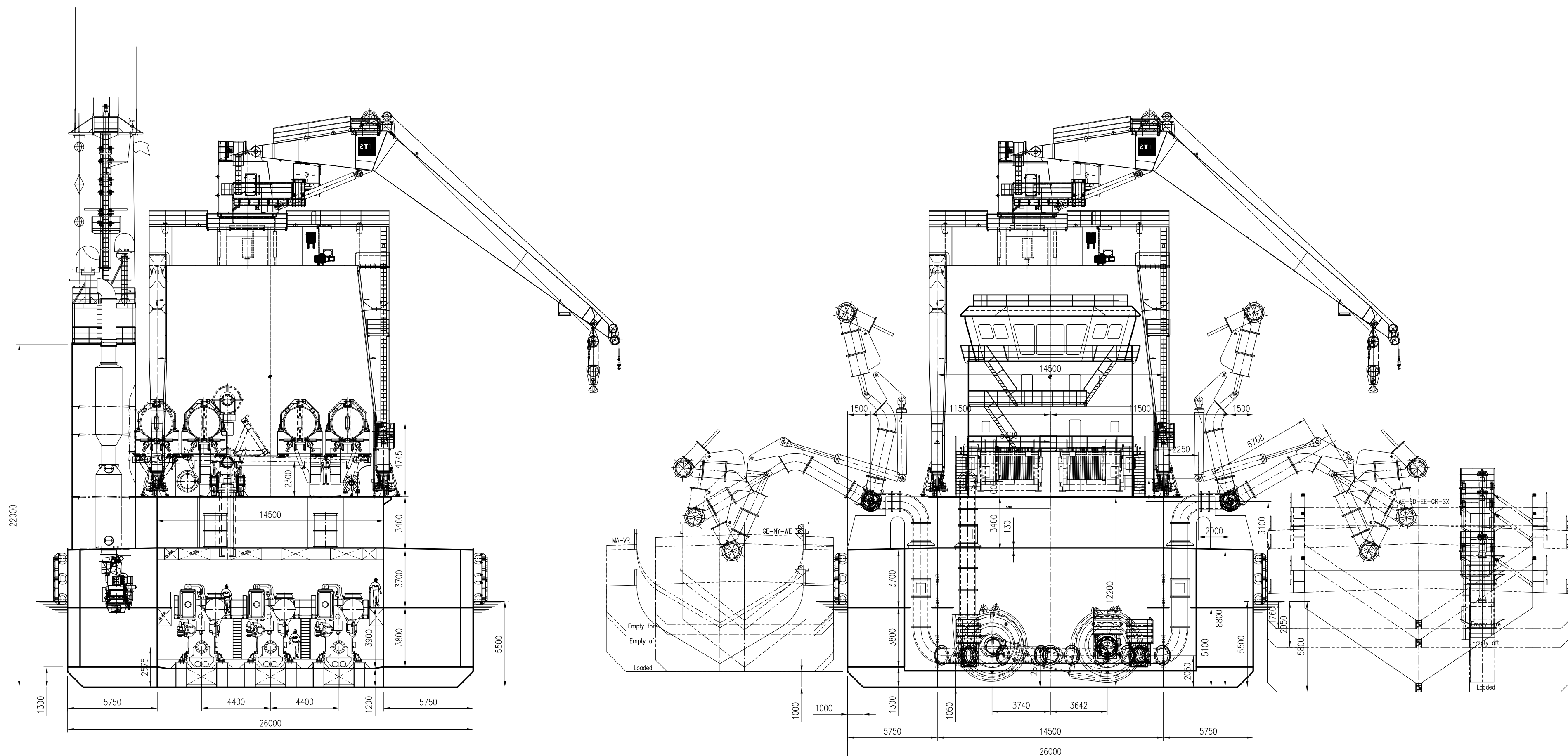
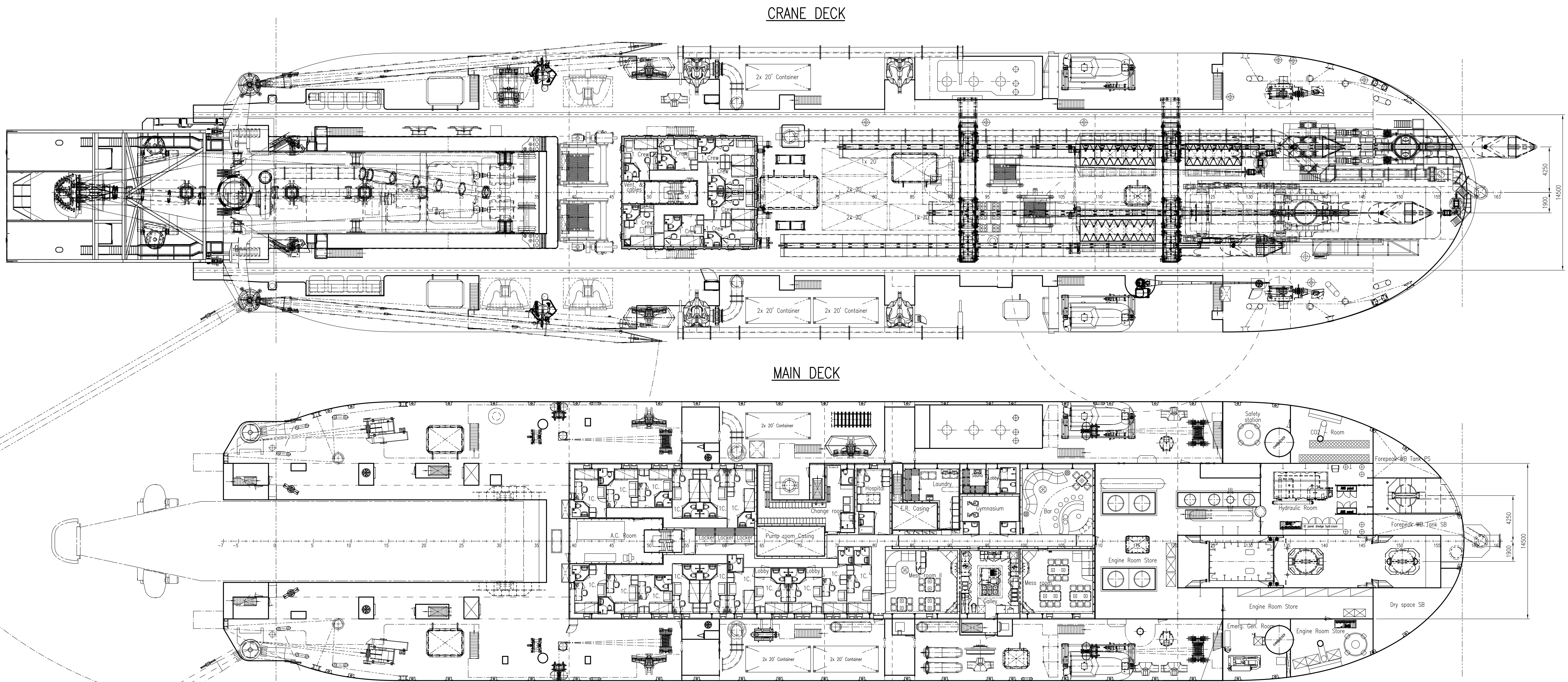
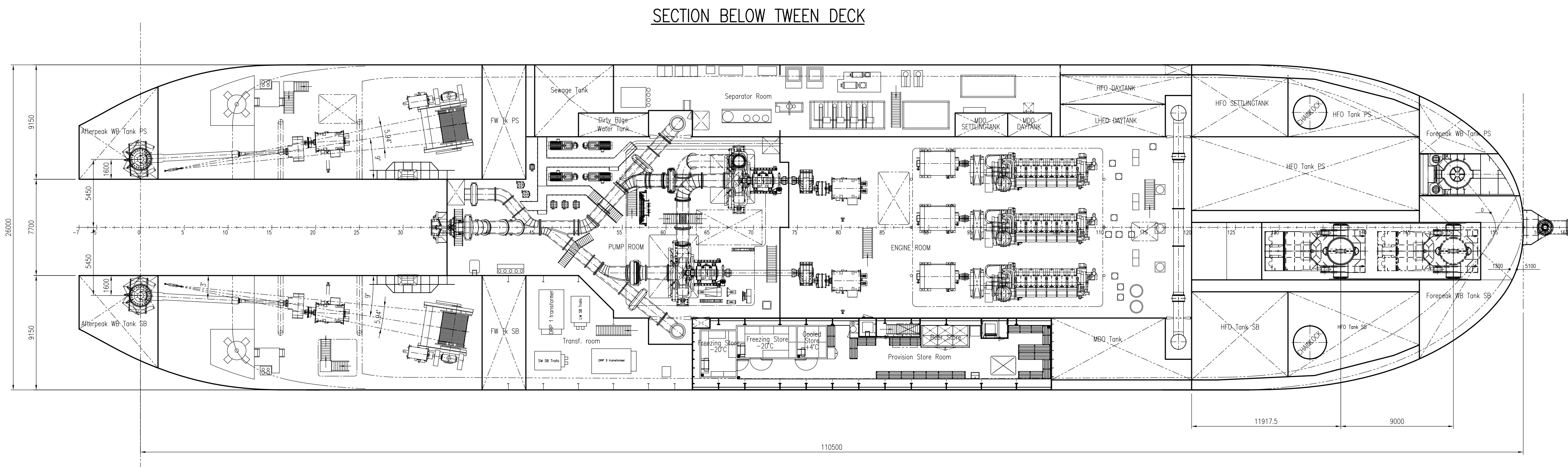
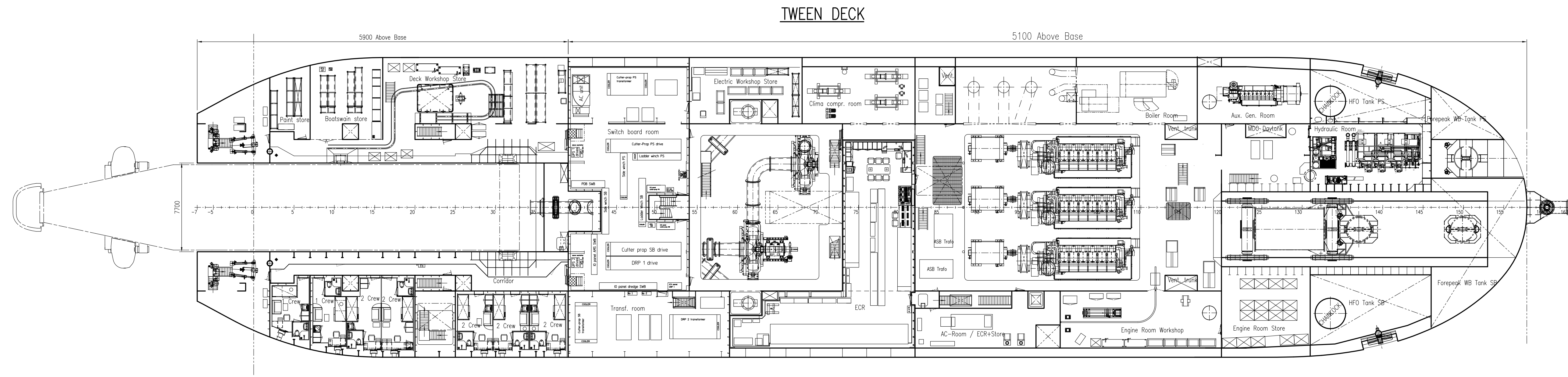
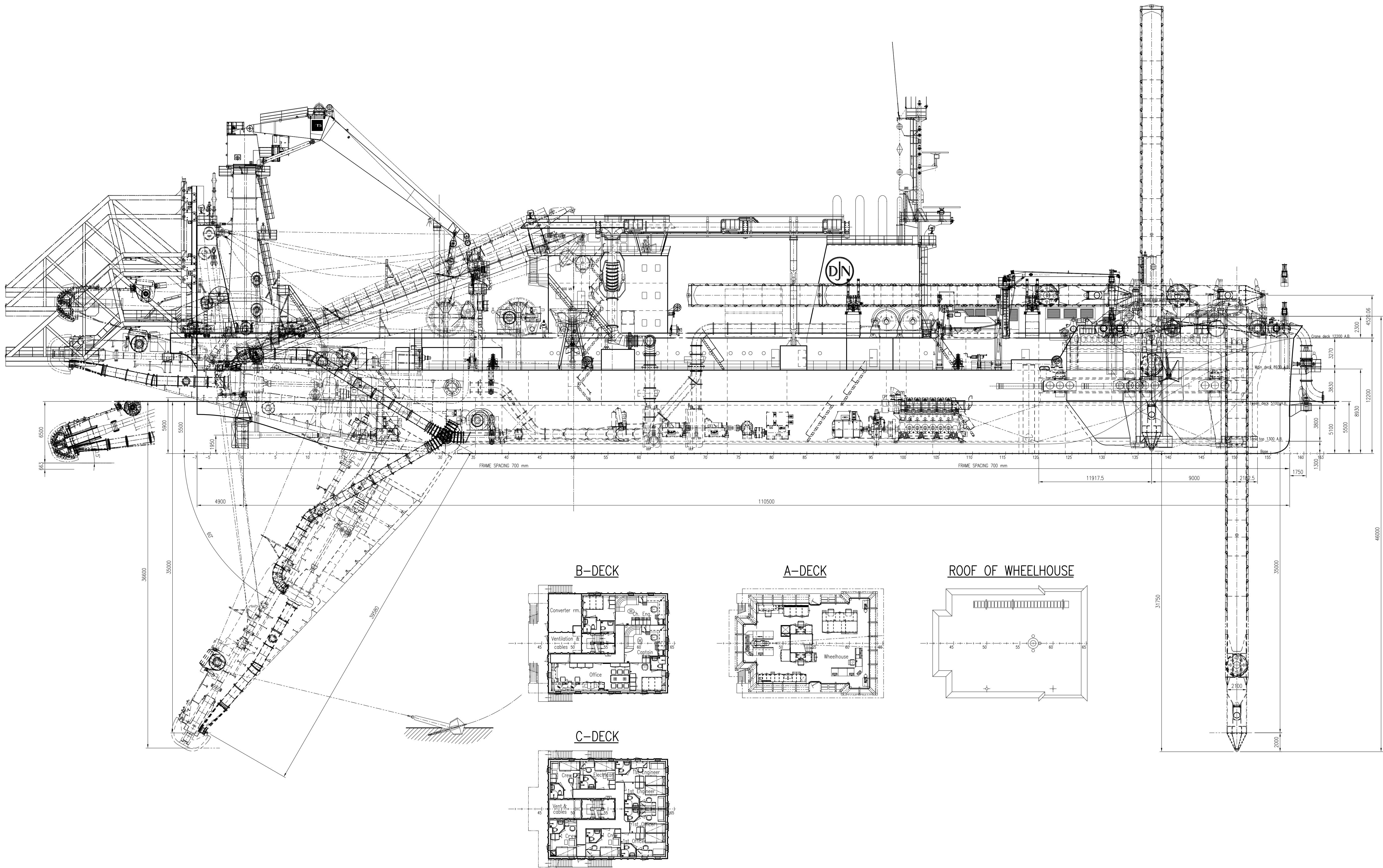
- [31] ISO 717-2:2013, „Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation“.
- [32] PARUNOV, J., PESTELLI, C., RUDAN, S., HADŽIĆ, N., SENJANOVIĆ, I.: „*Review of methods for structure born noise prediction on ships*“, Brodogradnja, Vol. 63, No. 2, 2012, pp. 134-139.
- [33] VLADIMIR, N., LONČAR, I., ANČIĆ, I., SENJANOVIĆ, I.: „*Prediction of Noise Performance of Ro-Ro Passenger ship by the Hybrid Statistical Energy Analysis*“, Pomorski zbornik (0554-6397) Special Issue (2018), 2; 29-45.
- [34] WERYK, M.: „*Ship on board noise propagation analysis methods*“, Hydroacoustics, Vol. 15, 2012, pp. 187-194.
- [35] KIM, T.M., KIM, J.T., KIM, J.S.: „*SEA-FEM hybrid analysis for predicting Inter-floor impact noise*“, Applied Acoustics, Vol. 129, 2018, pp. 397-407.
- [36] <http://www.noise-control.com/designernoise.php>, (Pristupljeno 19. lipnja 2018.).

## **PRILOZI**



- I. Tehnička dokumentacija analiziranog broda
- II. Grafički prikaz rezultata proračuna za sve odjeljke od interesa
- III. CD-R disc

# PRILOG I

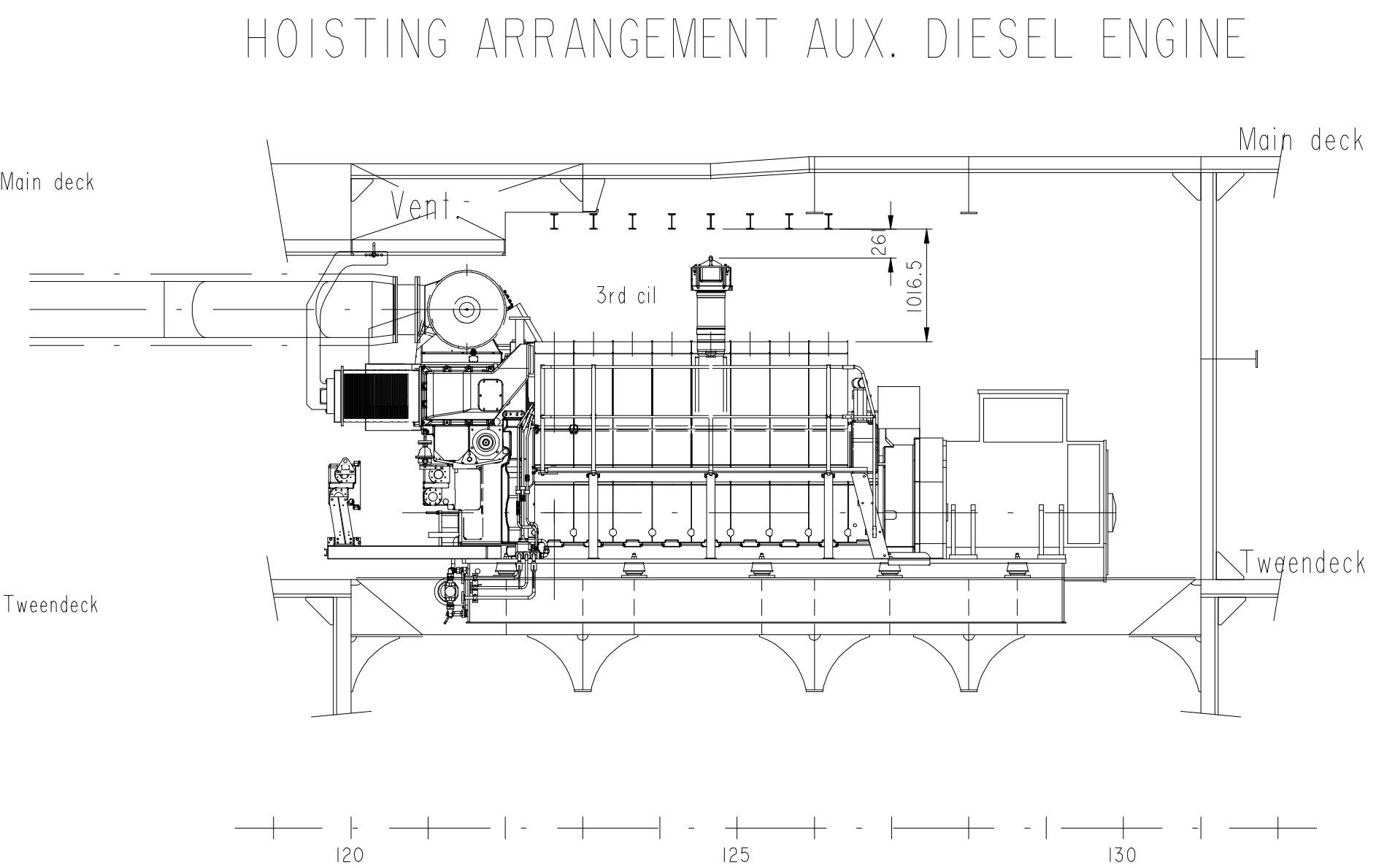
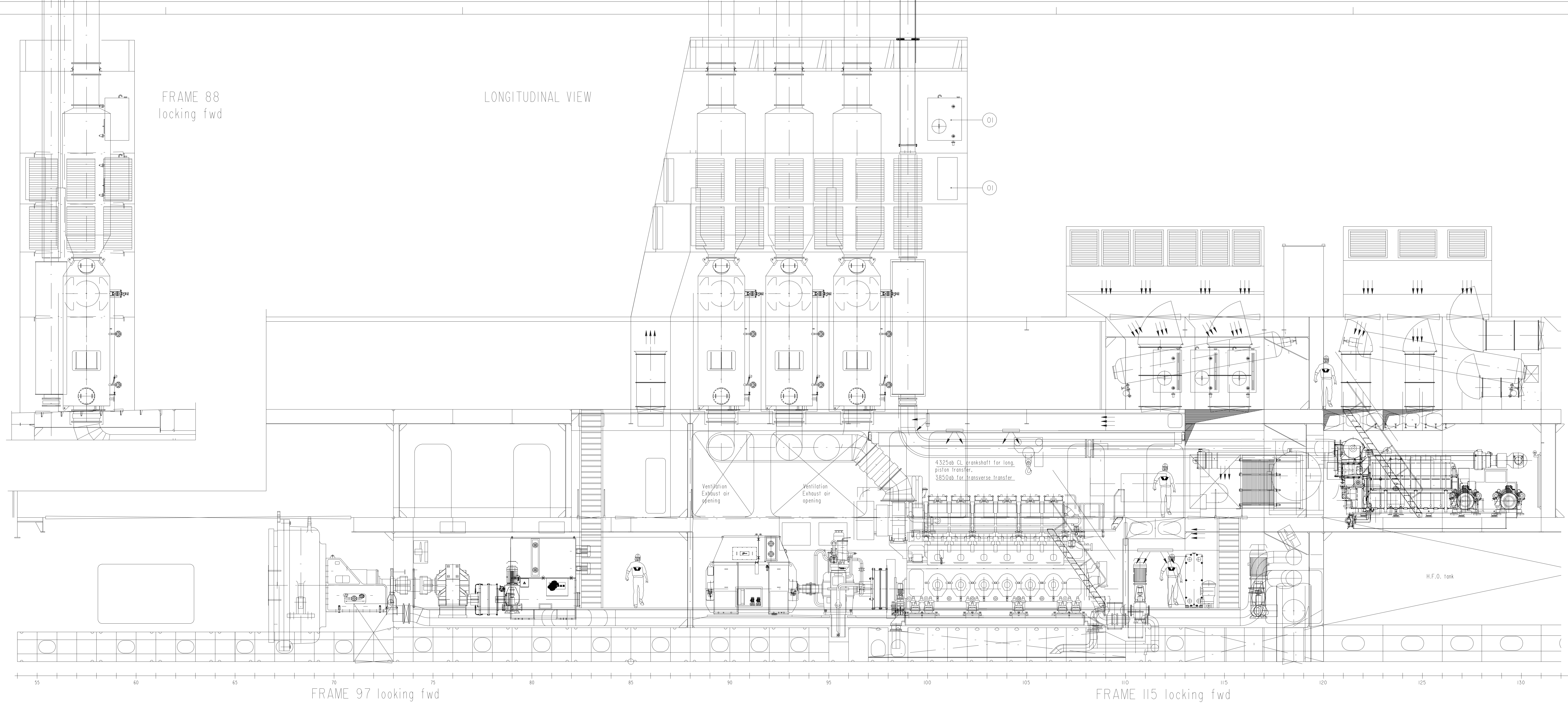




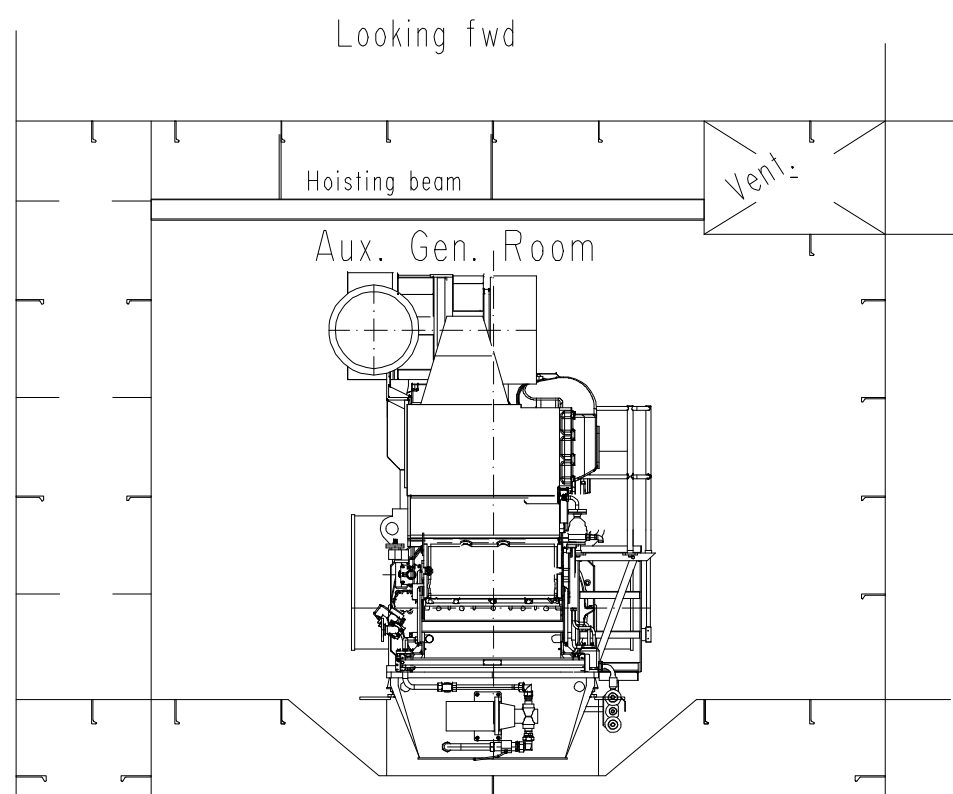
PRINCIPAL PARTICULARS	
LENGTH over all	138.86 m
LENGTH between p.p.	110.50 m
BREADTH	26.00 m
DEPTH to main deck	8.80 m
DEPTH to crane deck	12.20 m
DRAUGHT	5.90 m
DREDGING DEPTH	35.00 m
Suction pipe diameter	900 mm
Delivery pipe diameter	900 mm
COMPLEMENT	46 pers.

C	Generally updated			
B	Changed : funnel, disposition in accommodation, life boat, crane on fr. 115, disp. in hydraulic room on main deck & tween deck, disp. in switch board room & ECR, disp. in provision store room, added stairway on crane deck (fr.5)			
A	Generally updated by Owner.			
DRAWING		DRAWING		
				
BRODOKRADIŠTE PULA-RIJEKA		BRODOKRADIŠTE PULA-RIJEKA		
		PROJEKTOVALNO POSREDOVANJE POSREDOVANJE POSREDOVANJE		
		PROJEKTOVALNO POSREDOVANJE POSREDOVANJE POSREDOVANJE		
		B. Furić V. Burić S. Furić D. Burić		
		B. Furić V. Burić S. Furić D. Burić		
		THE DRAWING IS ELECTRONICALLY VAULT APPROVED		
GENERAL ARRANGEMENT				



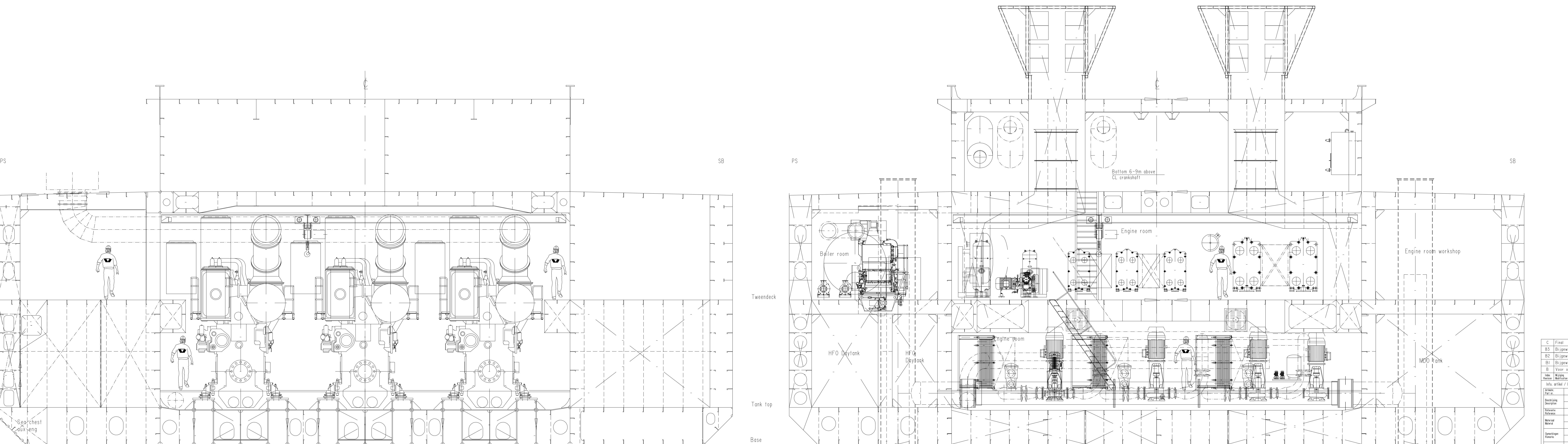


SECTION AT THIRD CILINDER



Lengte uitlaatgassen dempers (5400 MAN) in combinatie met de uitlaatgassen (4635 algemeen plan) ketels is te hoog voor de huidige schoorsteen

Position of engine is subject of torsional vibration calculation



Rev.	Date	Description	Draw. No.	Draw. Rev.
E			1-06-321	3 / 3
D				
C				
B				
A				

Rev.	Date	Description	Draw. No.	Draw. Rev.
E			1-06-321	3 / 3
D				
C				
B				
A				

**ENGINE ROOM GENERAL ARRANGEMENT**

**VUYK ENGINEERING ROTTERDAM**

P.O.Box 1, 2500 AA Capelle a/d IJssel  
Phone: +31 (0)6 4502550  
Fax: +31 (0)6 4502549  
e-mail: vuyk@vuyk-engineering.com

Naval Architects, Marine Engineers, Consultants

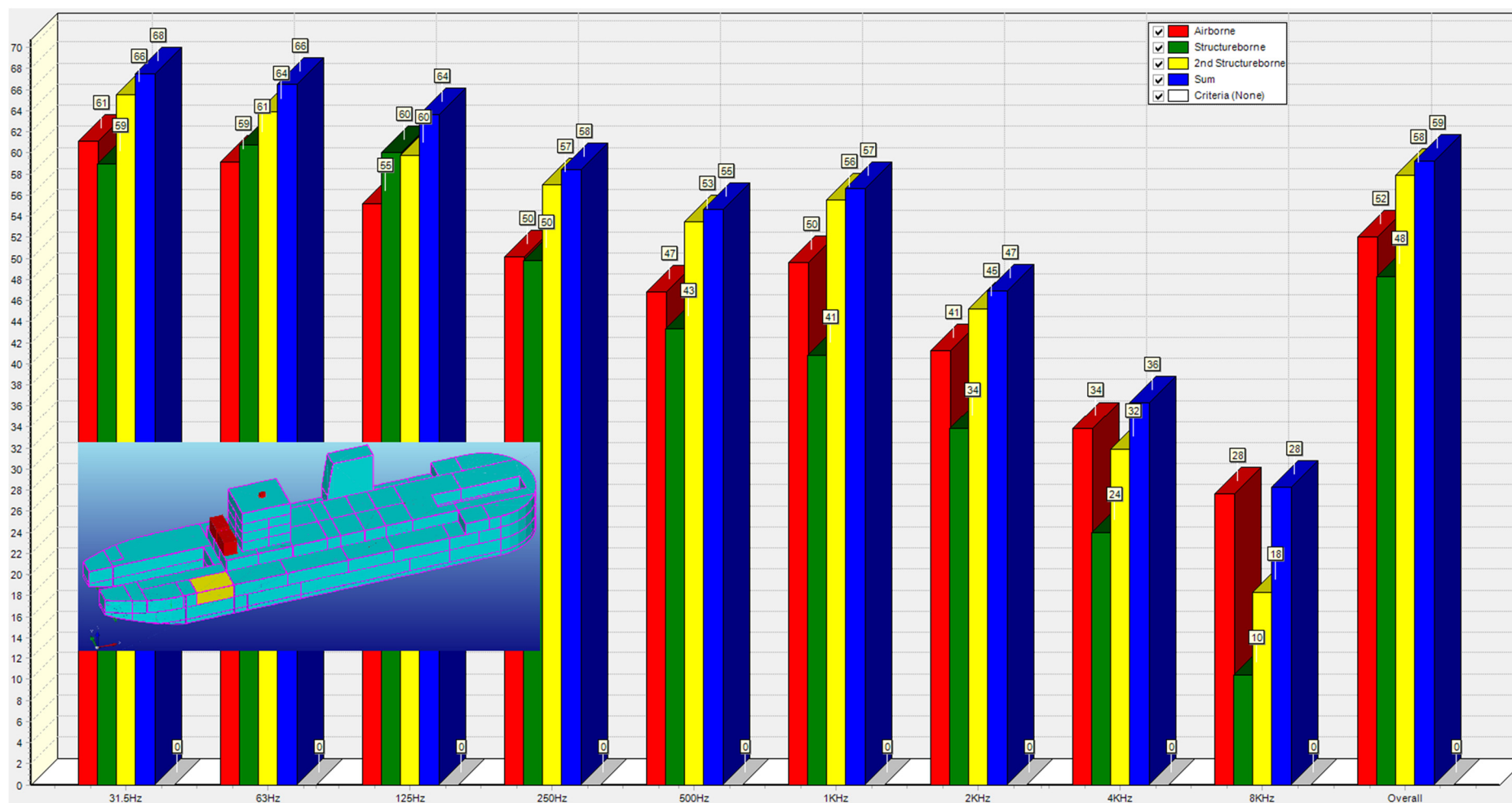
**Final**  
15 June 2007

**INRICHTING MACHINE KAMER**  
ARRANGEMENT ENGINE ROOM

**Jan De Nul GROUP**

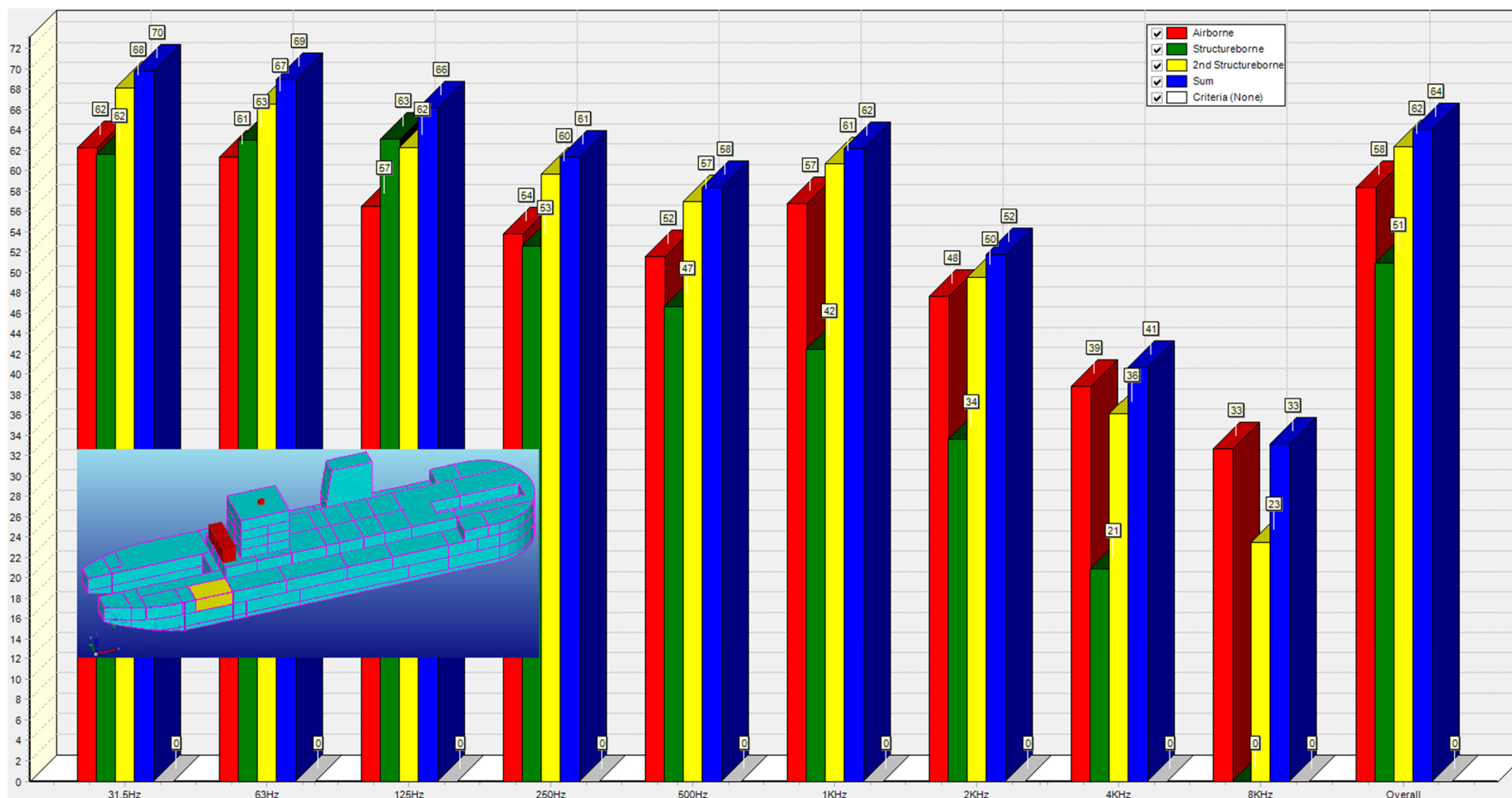
CSD 8064  
Totaal aantal bladen: 00-00-015  
Blad/Sheet: 3/3  
Index/Bladzijde: C

# PRILOG II

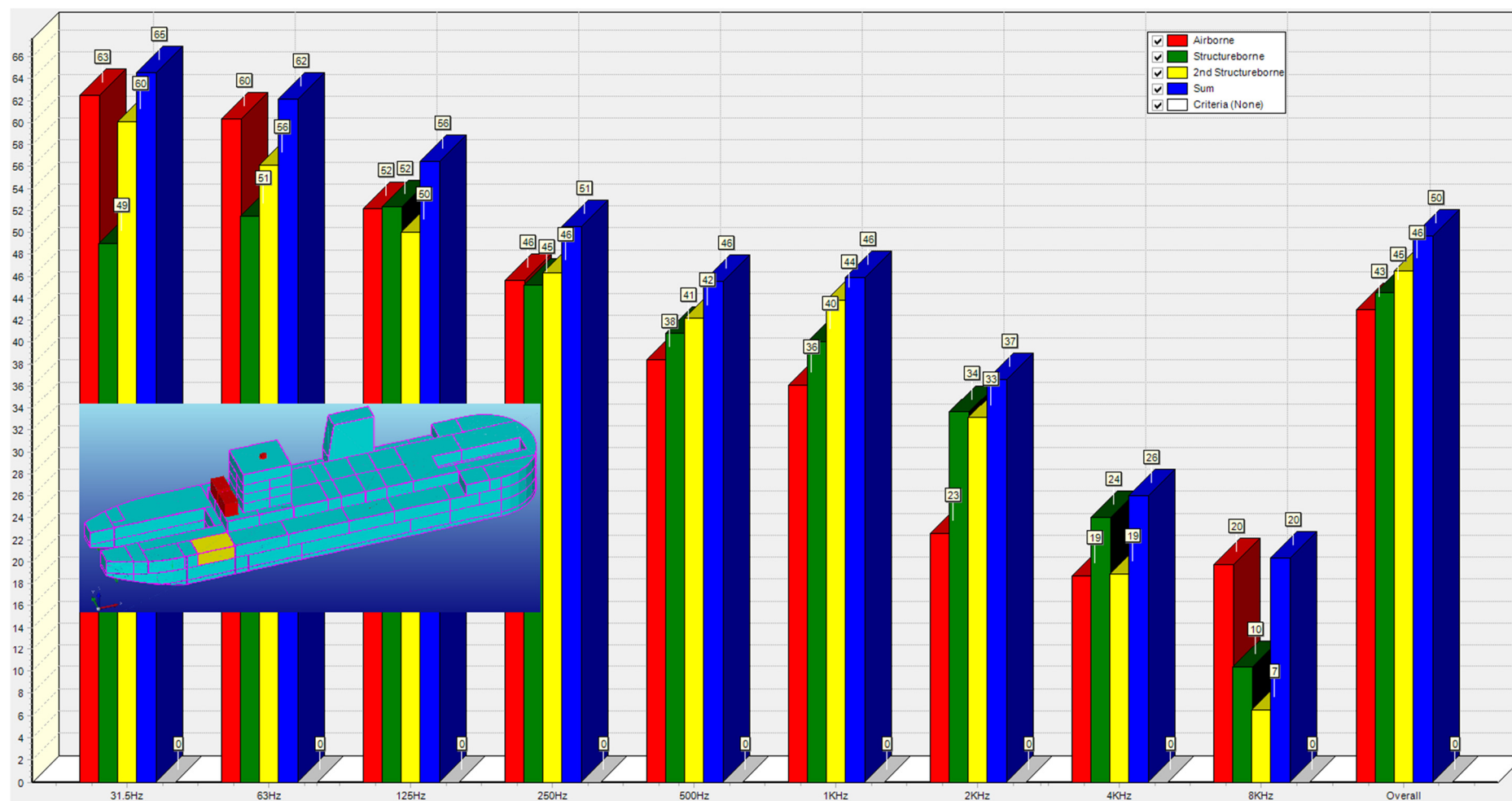


Slika 41. Razine zvučnog tlaka u kabini za dva člana posade, brod bez izolacije za vrijeme plovidbe

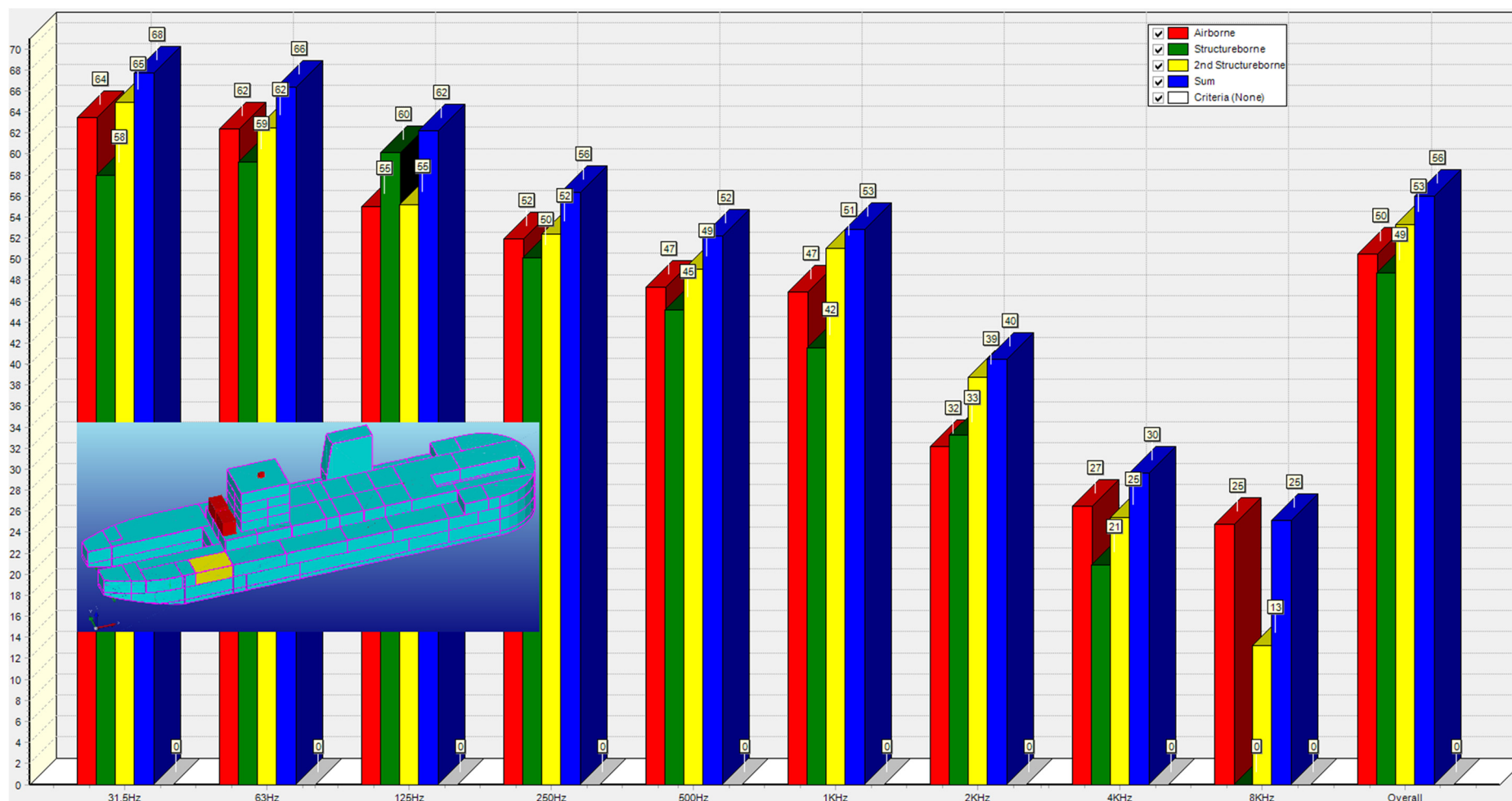




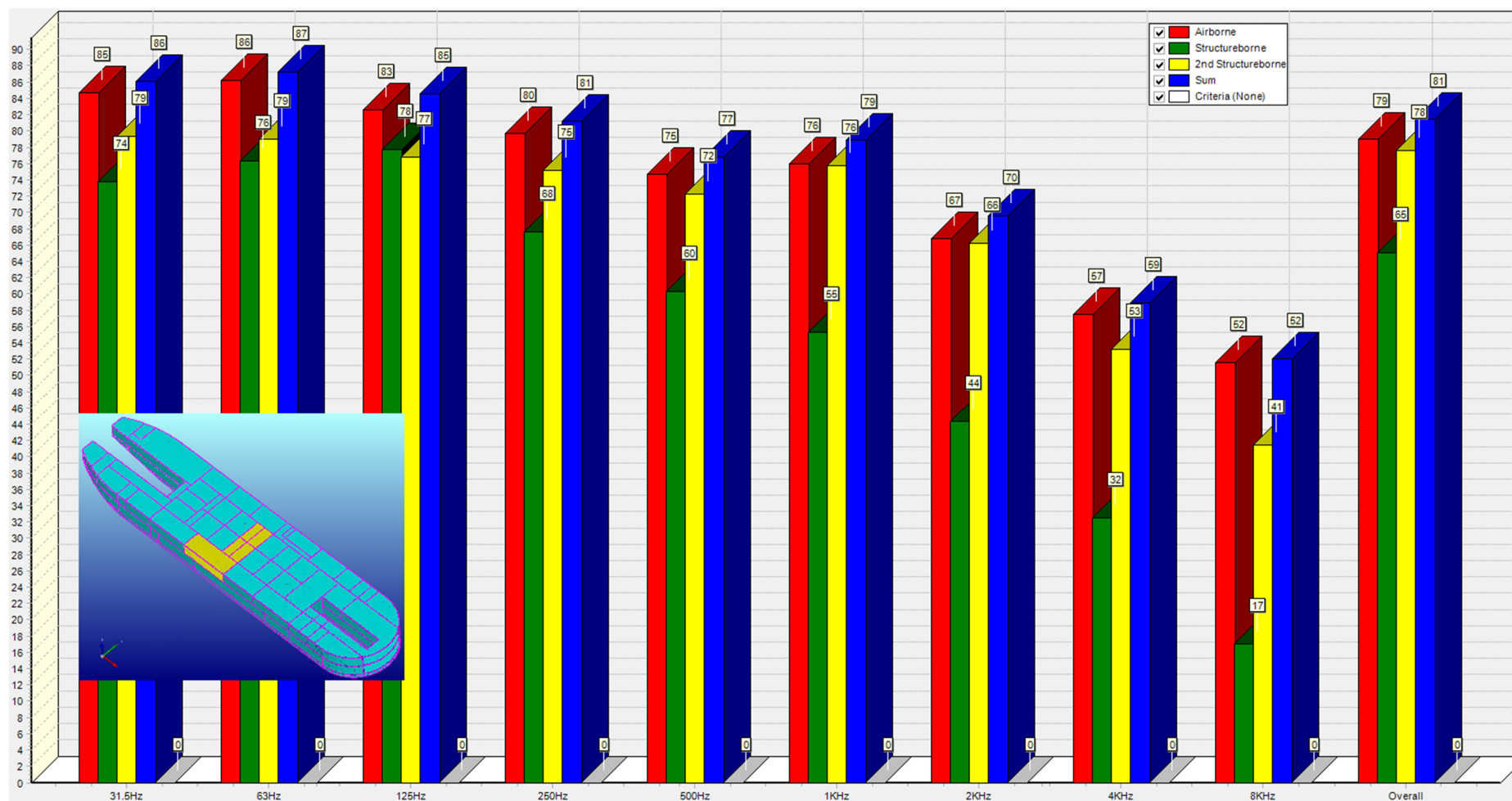
Slika 42. Razine zvučnog tlaka u kabini za dva člana posade, brod bez izolacije za vrijeme jaružanja



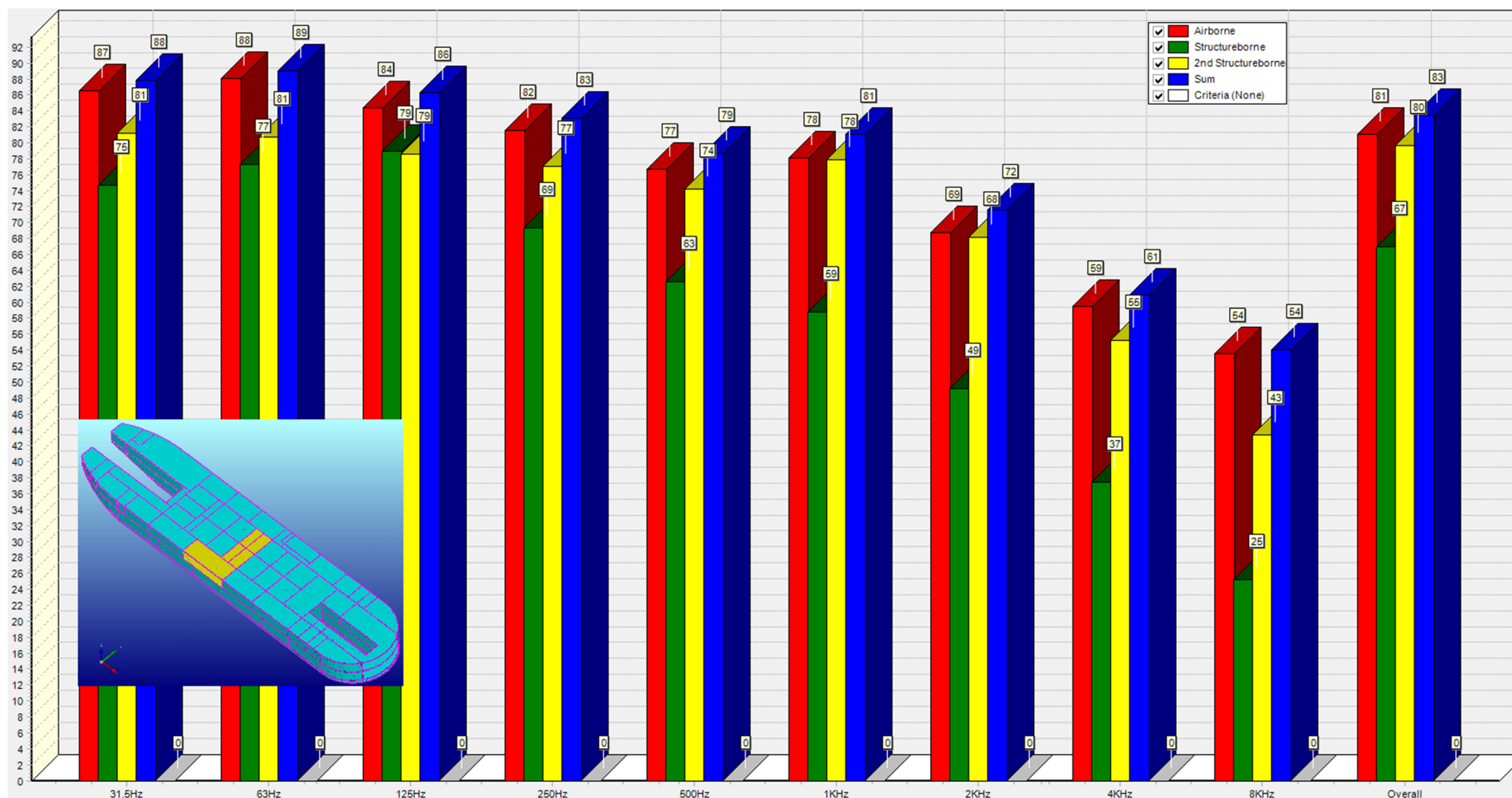
Slika 43. Razine zvučnog tlaka u kabini za dva člana posade, brod s izolacijom za vrijeme plovidbe



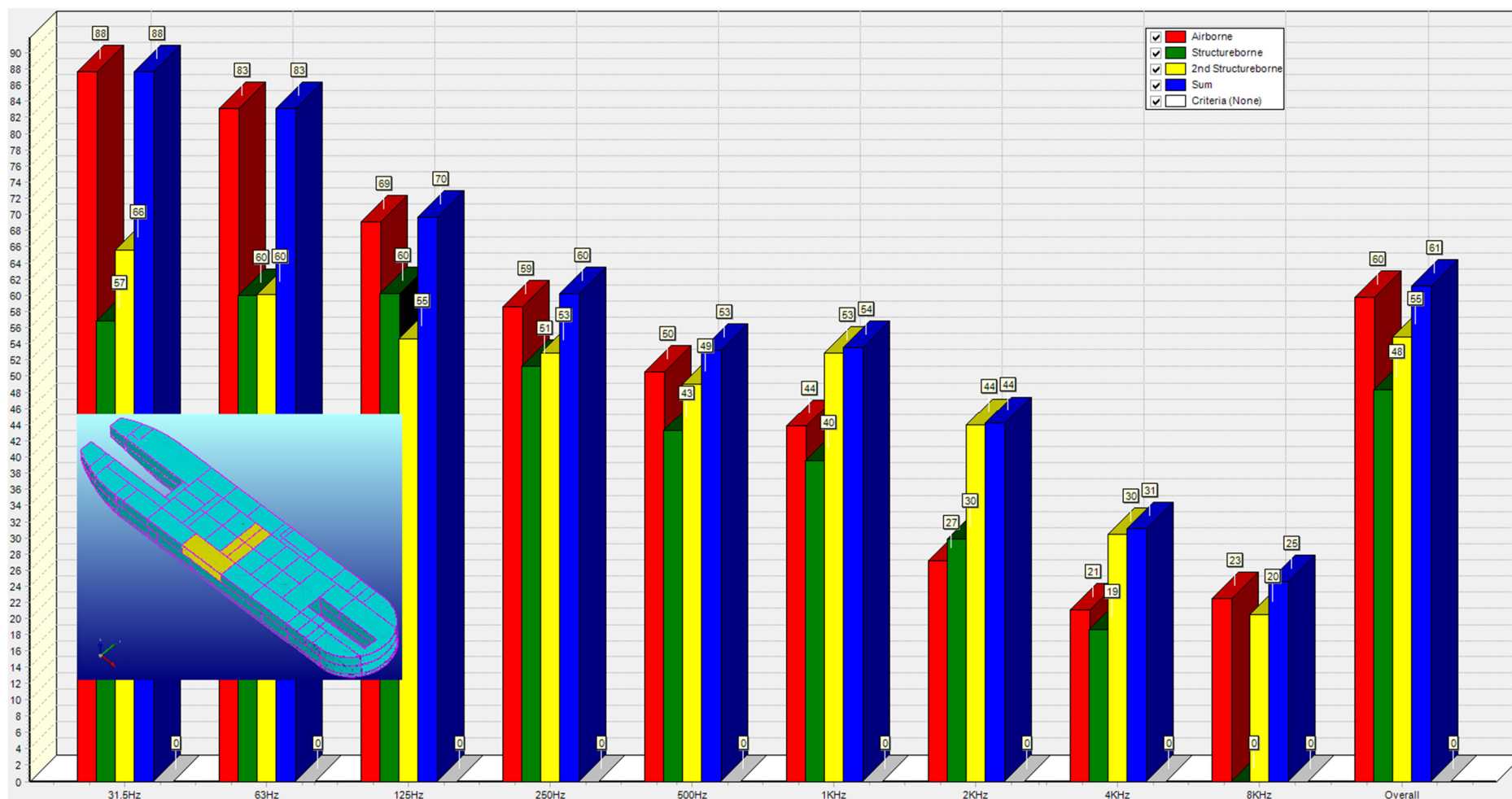
Slika 44. Razine zvučnog tlaka u kabini za dva člana posade, brod s izolacijom za vrijeme jaružanja



Slika 45. Razine zvučnog tlaka u upravljačkoj sobi strojarnice, brod bez izolacije za vrijeme plovidbe

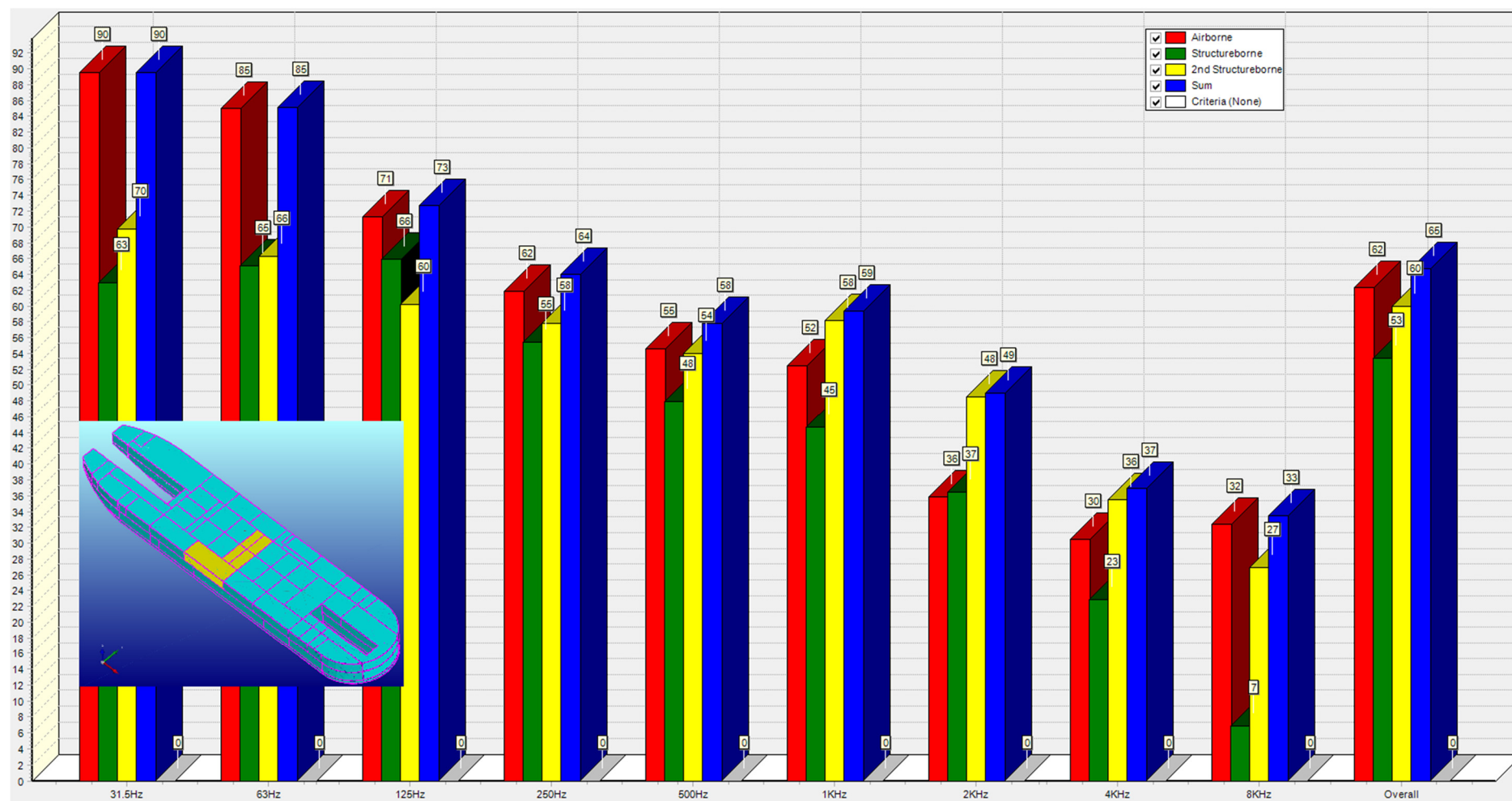


Slika 46. Razine zvučnog tlaka u upravljačkoj sobi strojarnice, brod bez izolacije za vrijeme jaružanja

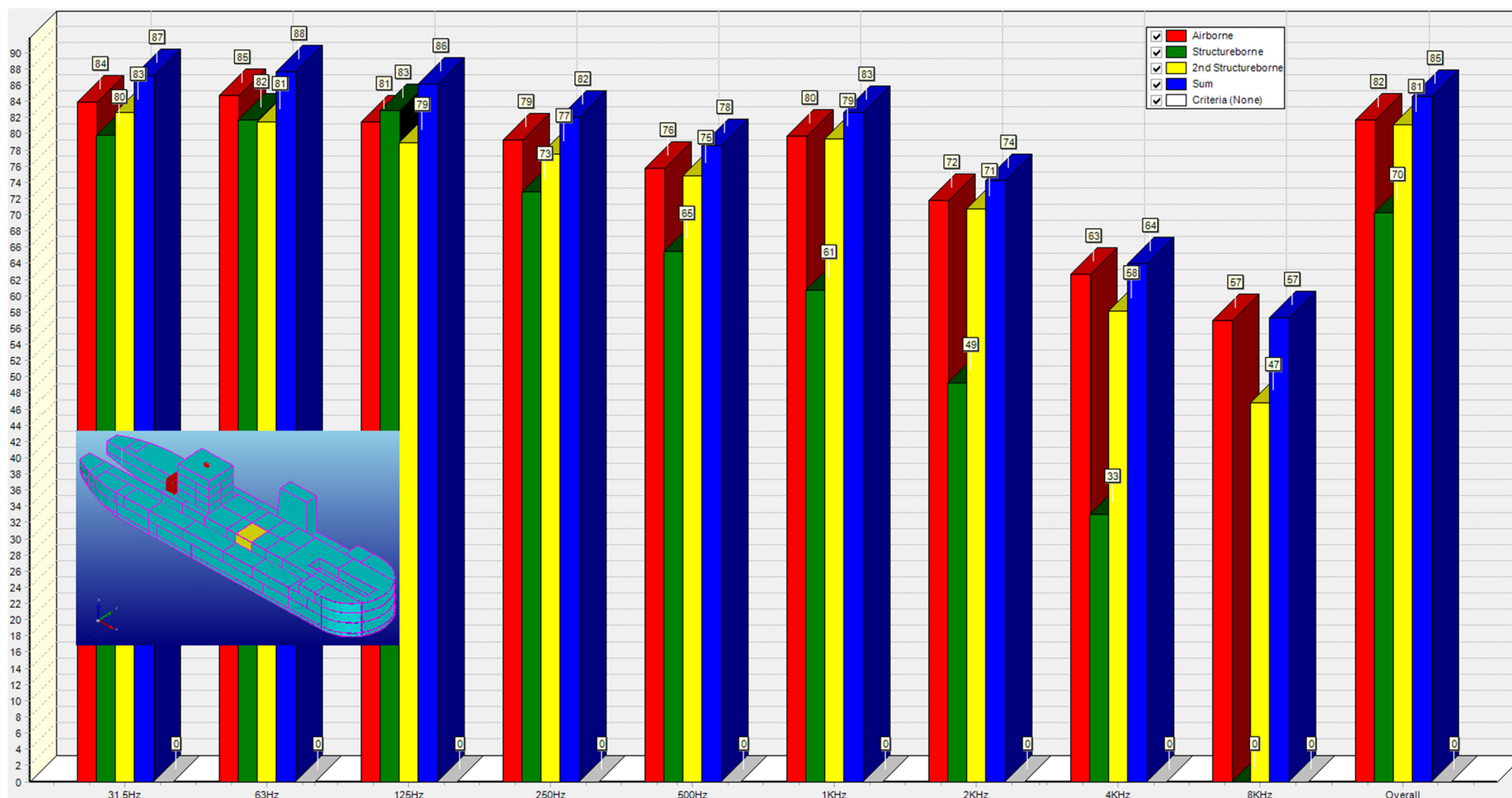


Slika 47. Razine zvučnog tlaka u upravljačkoj sobi strojarne, brod s izolacijom za vrijeme plovidbe



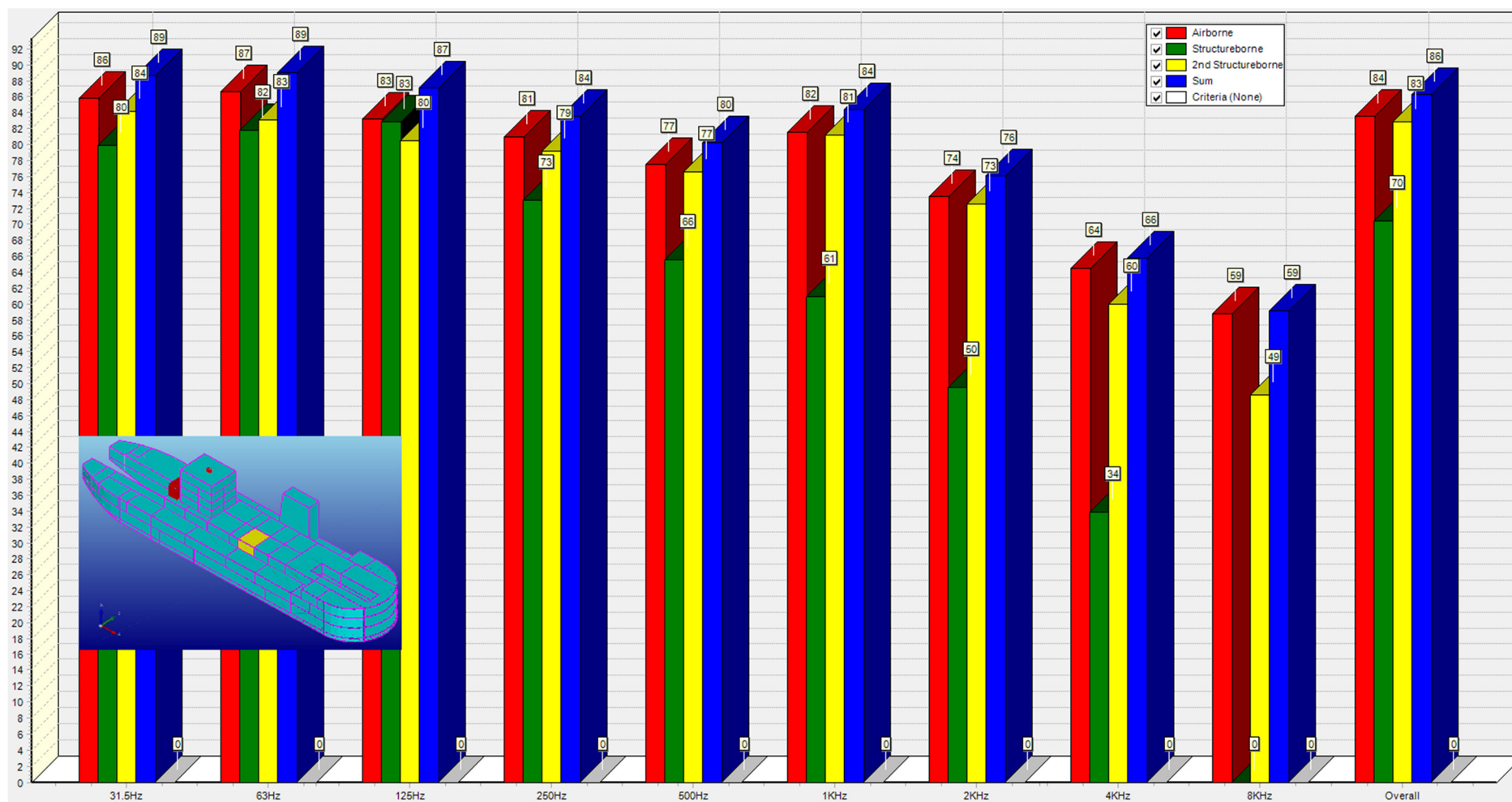


Slika 48. Razine zvučnog tlaka u upravljačkoj sobi strojarne, brod s izolacijom za vrijeme jaružanja

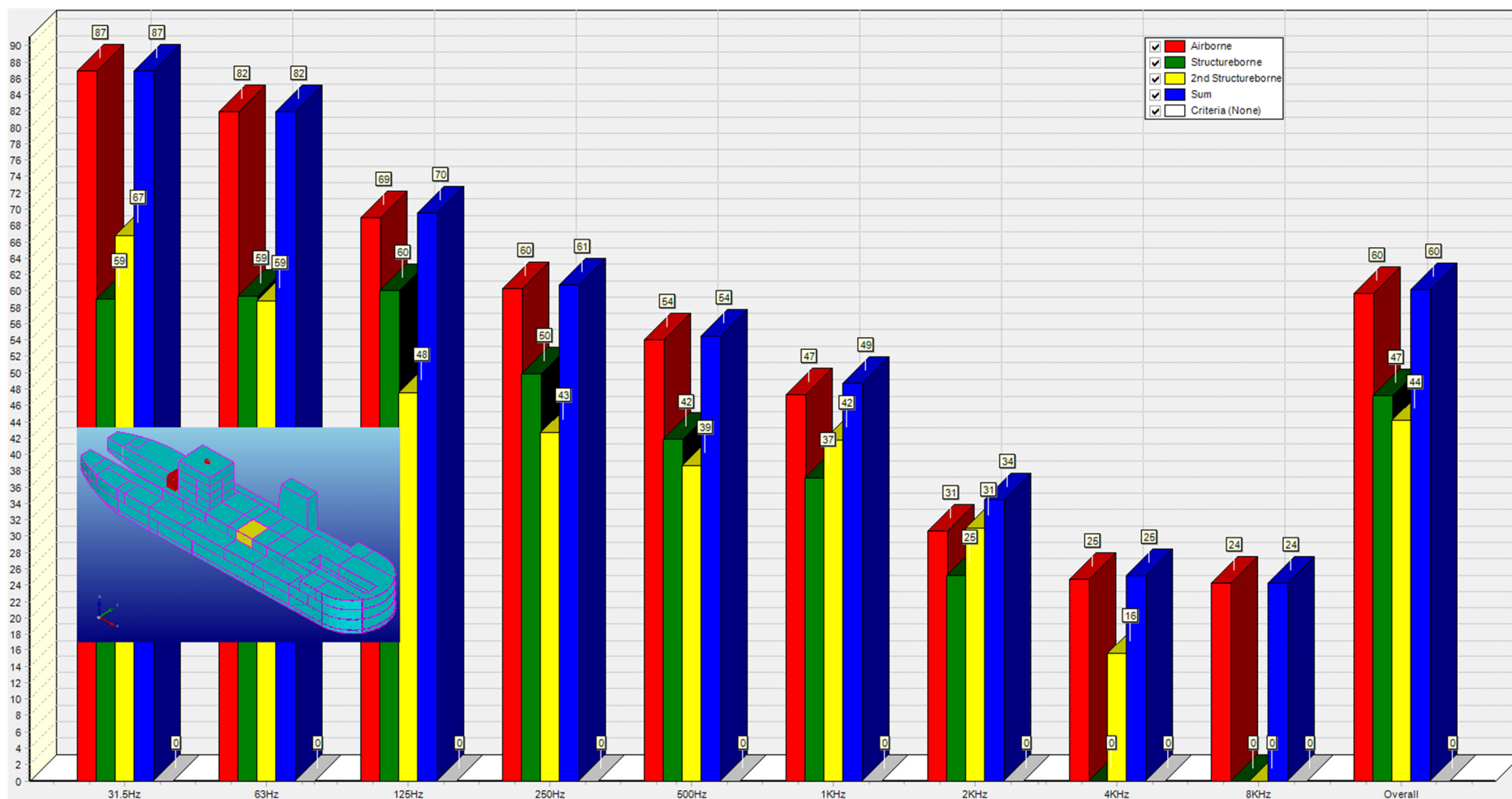


Slika 49. Razine zvučnog tlaka u kantini 2, brod bez izolacije za vrijeme plovidbe

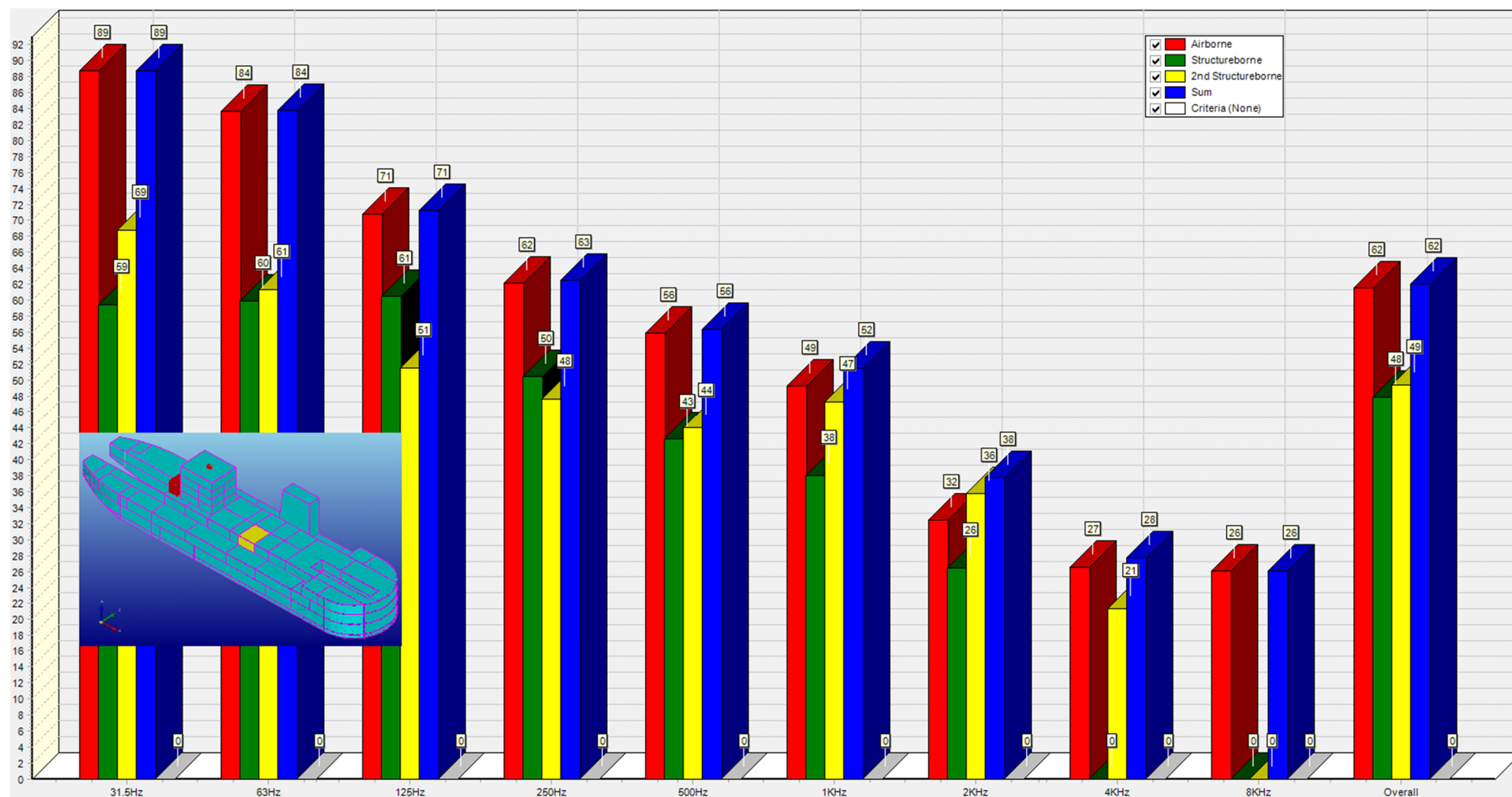




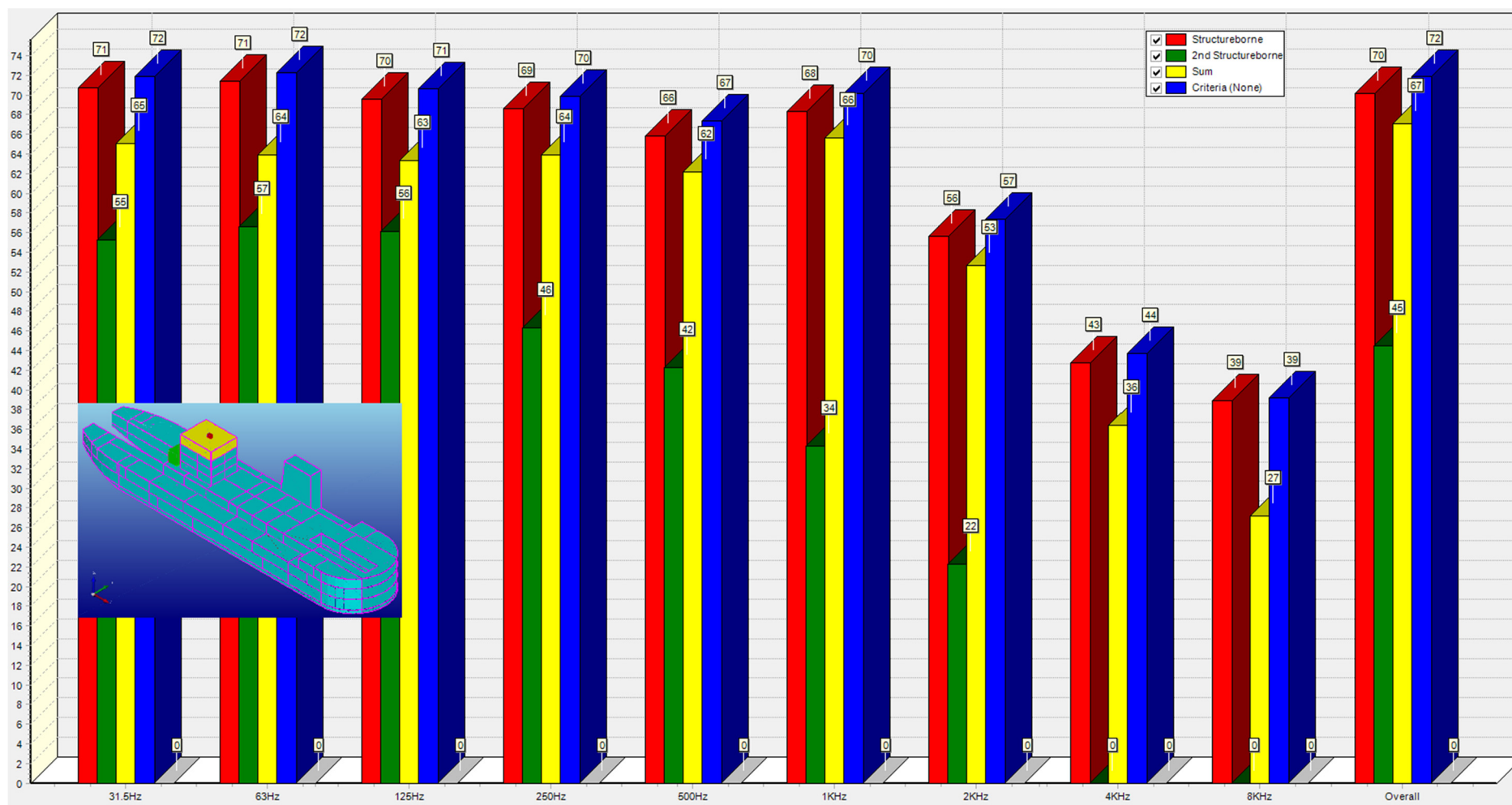
Slika 50. Razine zvučnog tlaka u kantini 2, brod bez izolacije za vrijeme jaružanja



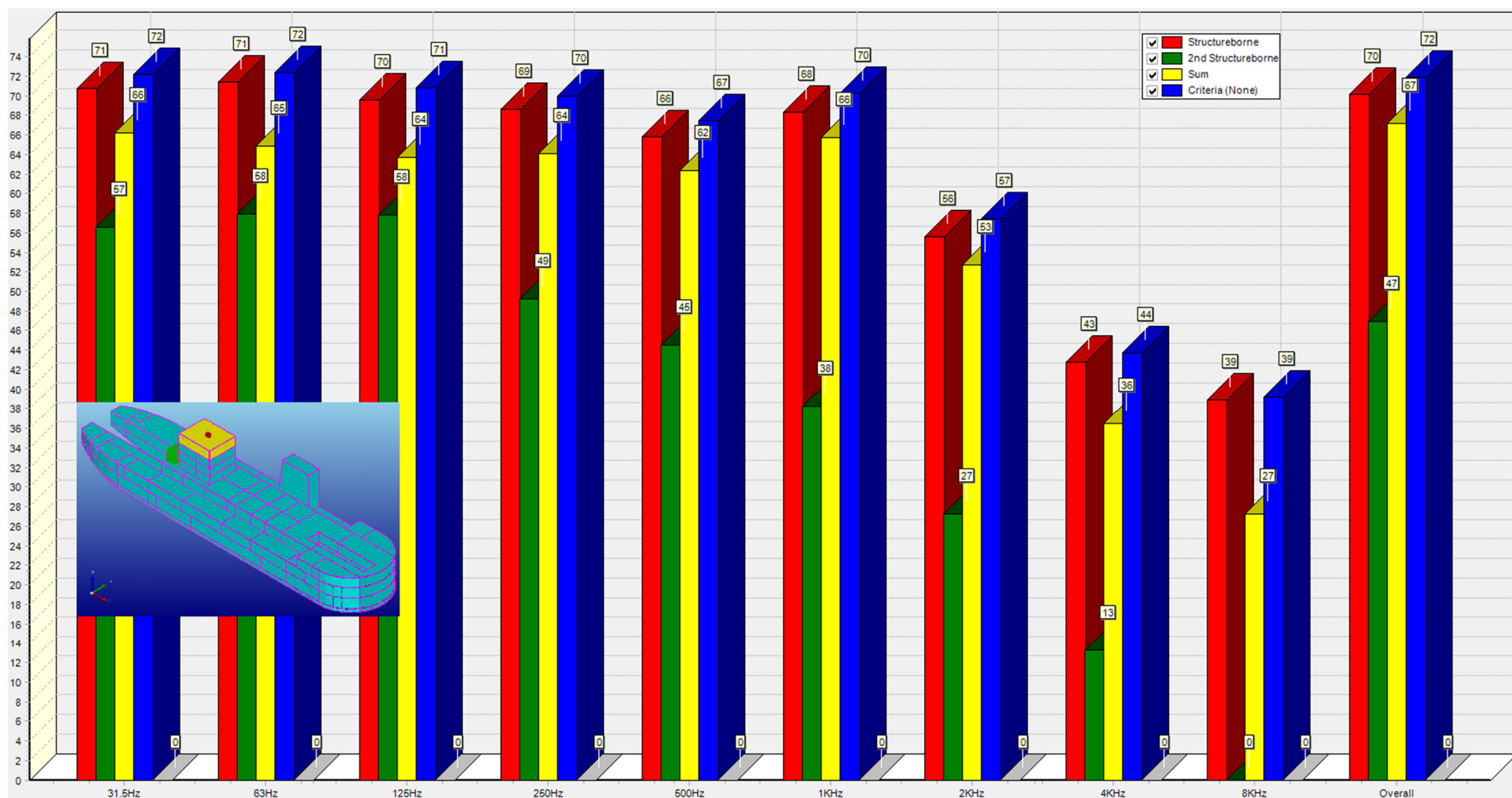
Slika 51. Razine zvučnog tlaka u kantini 2, brod s izolacijom za vrijeme plovidbe



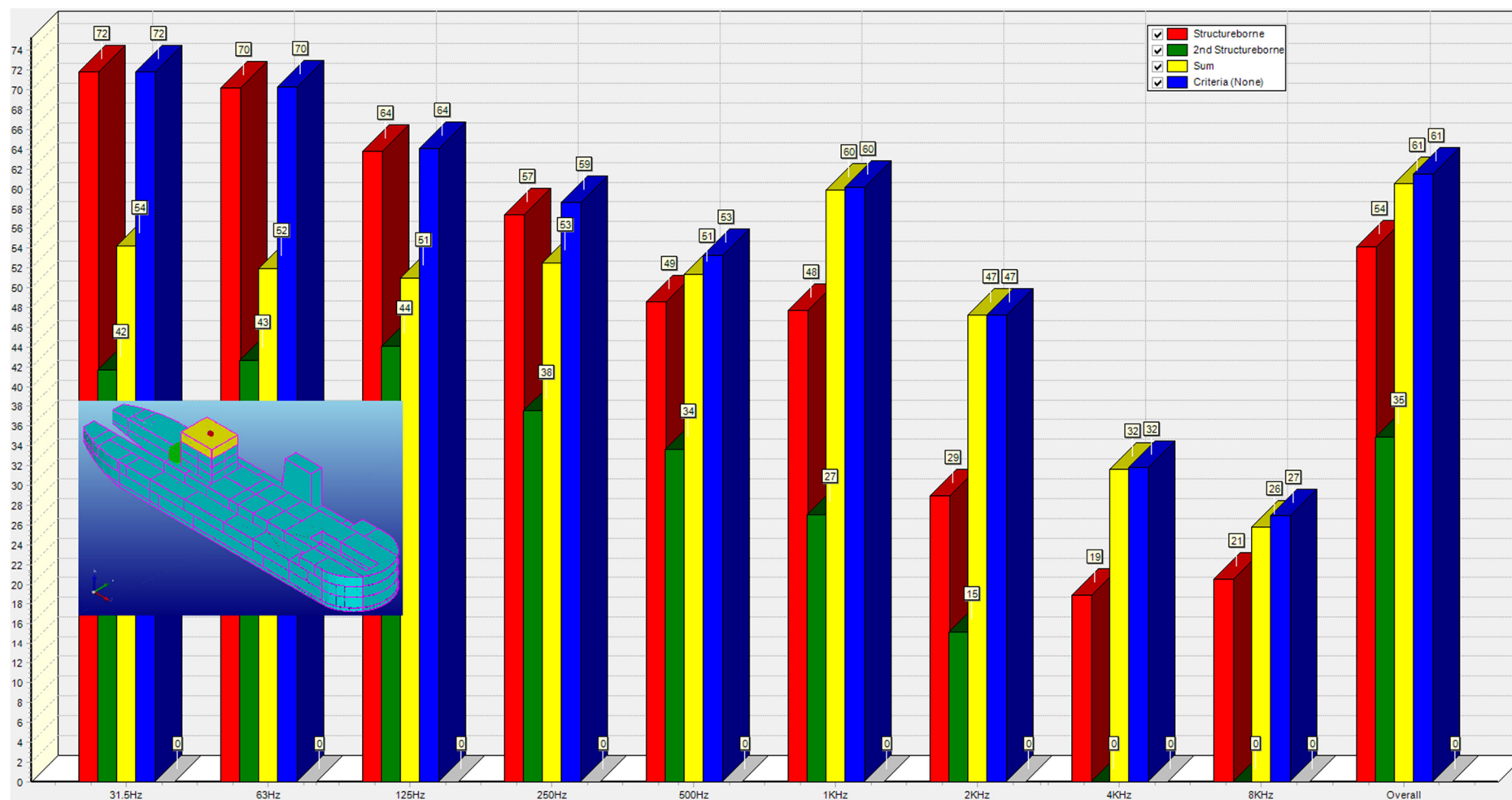
Slika 52. Razine zvučnog tlaka u kantini 2, brod s izolacijom za vrijeme jaružanja



Slika 53. Razine zvučnog tlaka u kormilarnici, brod bez izolacije za vrijeme plovidbe

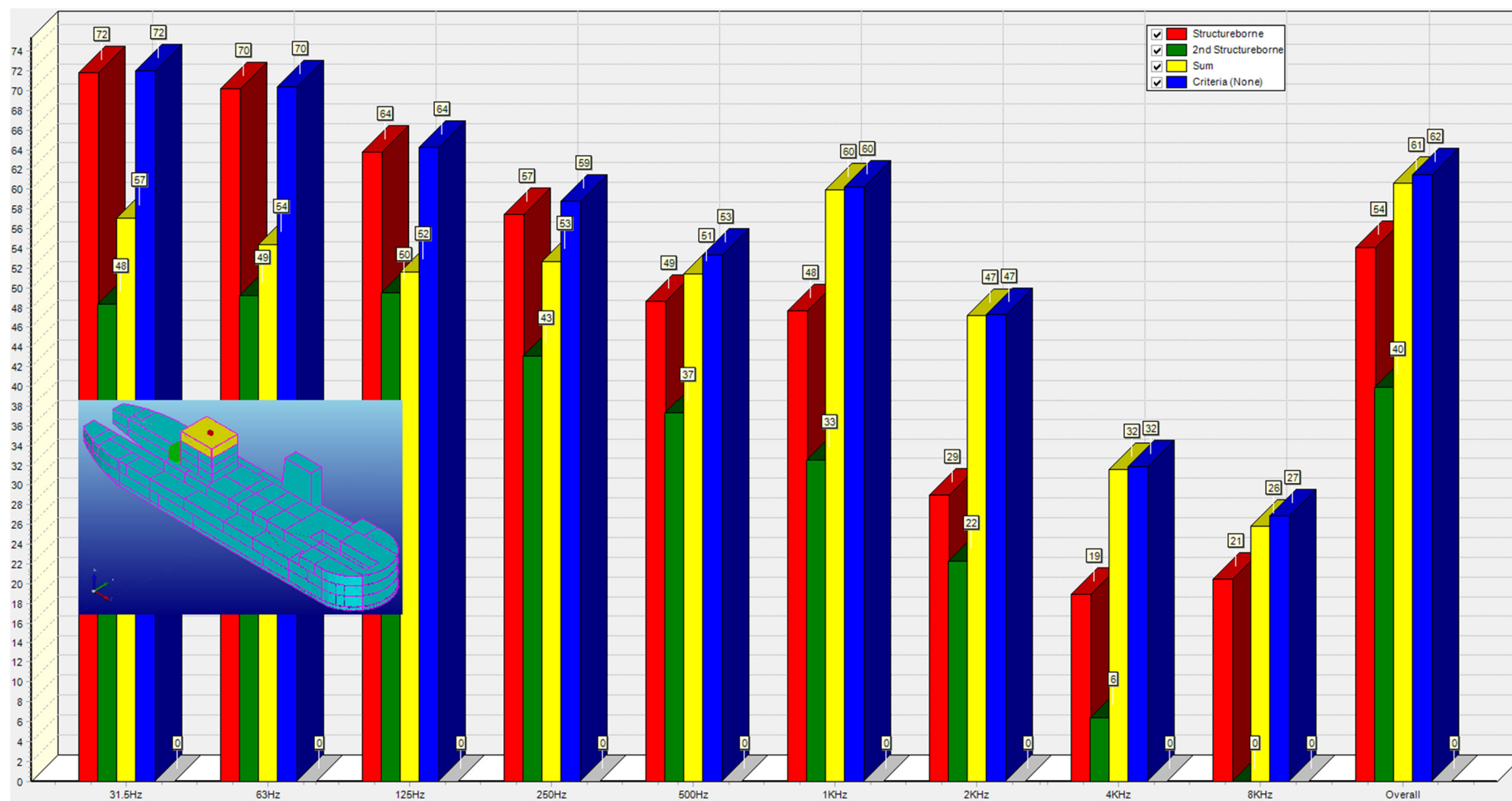


Slika 54. Razine zvučnog tlaka u kormilarnici, brod bez izolacije za vrijeme jaružanja



Slika 55. Razine zvučnog tlaka u kormilarnici, brod s izolacijom za vrijeme plovidbe





Slika 56. Razine zvučnog tlaka u kormilarnici, brod s izolacijom za vrijeme jaružanja